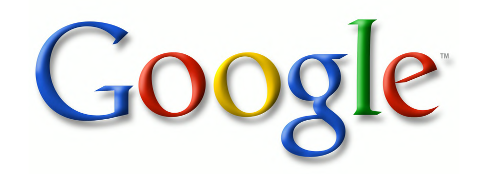
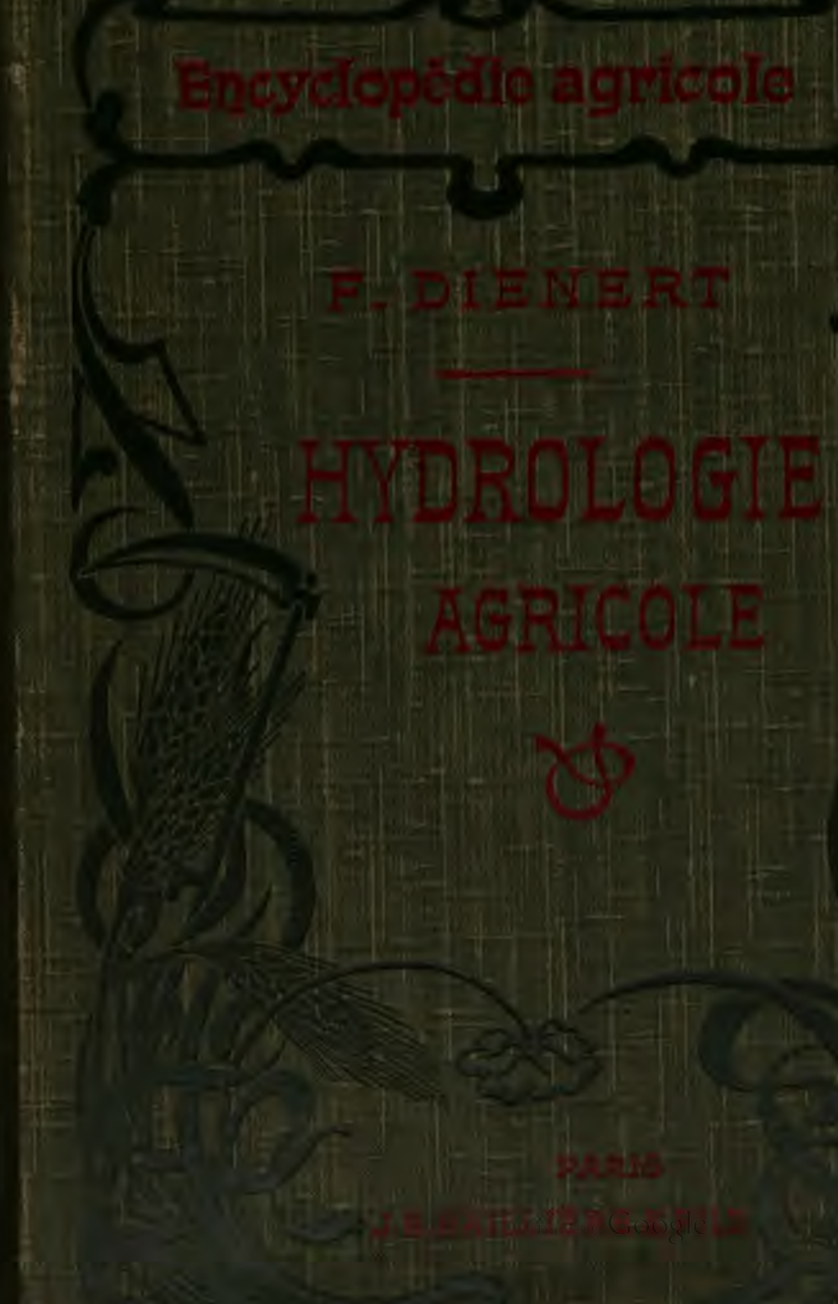

Google


Encyclopédie agricole
F. DIENERT
HYDROLOGIE
AGRICOLE
PARIS

ENCYCLOPÉDIE Technologique et Commerciale

Tous les volumes [illegible] 18, 19, 21, 22.

ENVO[illegible]

A.-E. BREHM

Les Merveilles de la NATURE

Collection recommandée par le Ministère de l'instruction publique.
Pour les bibliothèques de quartier et de professeurs dans les lycées et collèges et les distributions de prix.

L'HOMME ET LES ANIMAUX

Description populaire des Races Humaines et du Règne Animal

Caractères, Mœurs, Instincts, Habitude et Régime, Chasses, Combats Captivité, Domesticité, Acclimatation, Usages et Produits.

10 volumes — **10 volumes**

Les Races Humaines
Par R. VERNEAU
1 vol. gr. in-8, 792 pages avec 531 figures. 12 fr.

Les Mammifères
Édition française par Z. GERBE.
2 vol. gr. in-8, 1636 pages avec 728 fig. et 40 pl.................... 24 fr.

Les Oiseaux
Édition française par Z. GERBE
2 vol. gr. in-8, 1697 pages avec 482 fig. et 40 pl.................... 24 fr.

Les Reptiles et les Batraciens
Édition française par E. SAUVAGE
1 vol. grand in-8, 762 pages avec 524 fig. et 20 pl.................... 12 fr.

Les Poissons et les Crustacés
Edition française par E. SAUVAGE et J. KUNCKEL D'HERCULAIS
1 vol. gr. in-8, 836 pages avec 789 fig. et 20 pl.................... 12 fr.

Les Insectes
Édition française
Par J. KUNCKEL D'HERCULAIS
2 vol. gr. in-8, 1522 pages avec 2068 fig. et 36 pl.................... 24 fr.

Les Vers, les Mollusques
Les Échinodermes, les Zoophytes, les Protozoaires et les Animaux des grandes profondeurs.
Édition française par A.-T. de ROCHEBRUNE
1 vol. gr. in-8, 780 pages avec 1302 fig. et 20 pl.................... 12 fr.

LA TERRE

2 volumes — **2 volumes**

La Terre, les Mers et les Continents
Par P. PRIEM
1 vol. gr. in-8, 708 p. avec 757 fig. 12 fr.

La Terre avant l'apparition de l'homme
Par P. PRIEM
1 vol. gr. in-8, 715 p. avec 856 fig. 12 fr.

LES PLANTES

3 volumes — **3 volumes**

Le Monde des Plantes
Par P. CONSTANTIN
2 vol. gr. in-8 1584 p. avsc 1752 fig. 24 fr.

La Vie des Plantes
Par P. CONSTANTIN et d'HUBERT
1 vol. gr. in-8, 812 p. avec 1340 fig. 12 fr.

Ensemble, 15 volumes grand in-8, ensemble 11854 pages, avec 11129 figures intercalées dans le texte et 176 planches tirées sur papier teinté, 180 francs.

CHAQUE VOLUME SE VEND SÉPARÉMENT

Broché 12 fr. — Relié en demi-chagrin, plats toile, tranches dorées, 17 fr.

ENVOI FRANCO CONTRE UN MANDAT SUR LA POSTE

ENCYCLOPÉDIE AGRICOLE

Publiée sous la direction de G. WERY

FRÉDÉRIC DIENERT

HYDROLOGIE AGRICOLE

ENCYCLOPÉDIE AGRICOLE

40 volumes in-18 de chacun 400 à 500 pages, illustrés de nombreuses figures.
Chaque volume : broché, 5 fr.; cartonné, 6 fr.

I. — CULTURE ET AMÉLIORATION DU SOL

Agriculture générale, 2 vol. : 1. *Le sol et les labours*..... 2. *Les semailles et les récoltes*.	M. P. Diffloth, professeur spécial d'agriculture.
Engrais...........................	M. Garola, prof. départ. d'agricult. d'Eure-et-Loir.

II. — PRODUCTION ET CULTURE DES PLANTES

Botanique agricole................	MM. Schribaux et Nanot.
Céréales.......................... *Plantes fourragères*.............	M. Garola, professeur départemental d'agriculture d'Eure-et-Loir.
Plantes industrielles............	M. Hitier, propriétaire agriculteur, maître de conf. à l'Institut agronomique.
Culture potagère................	M. Léon Bussard, s.-directeur de la station d'essais de semences à l'Institut agronomique.
Arboriculture fruitière..........	MM. Léon Bussard et G. Duval.
Sylviculture......................	M. Fron, inspecteur adjoint des eaux et forêts.
Viticulture.......................	M. Pacottet, propriétaire viticulteur, répétiteur l'Institut agronomique.
Cultures méridionales............	MM. Rivière, directeur du jardin d'essais, à Alger, et Lecq, propr. agric., insp. de l'agric.

II. — ZOOLOGIE, PRODUCTION ET ÉLEVAGE DES ANIMAUX, CHASSE ET PÊCHE

Zoologie agricole.................. *Entomologie et Parasitologie agric.*	M. G. Guénaux, répétiteur à l'Institut agronomique.
Zootechnie générale............... *Zootechnie du Cheval*............ *Zootechnie des Bovidés*............ *Zootechnie: Moutons, Chèvres, Porcs.*	M. P. Diffloth, professeur spécial d'agriculture.
Alimentation des Animaux.......	M. Gouin, propriétaire agriculteur, ing. agronome.
Aquiculture.......................	MM. Deloncle et C. Guénaux.
Apiculture........................	M. Hommell, professeur régional d'apiculture.
Aviculture........................	M. Voitellier, prof. spécial d'agriculture à Meaux.
Sériciculture.....................	M. Vieil, ancien sous-directeur du Rousset.
Chasse, Elevage, Piégeage........	M. A. de Lesse, ing. agronome, propriétaire agric.
Elevage et Dressage..............	M. Bonnefont.

IV. — TECHNOLOGIE AGRICOLE

Technologie agricole (Sucrerie, Meunerie, Boulangerie, Féculerie, Amidonnerie, Glucoserie)...	M. Saillard, professeur à l'École des industries agricoles de Douai.
Industries agric. de fermentation, Brasserie........................	M. Boullanger, chef de Laboratoire à l'Institut Pasteur de Lille.
Vinification.......................	M. Pacottet, propr. viticulteur, répétiteur à l'Institut agronomique.
Laiterie...........................	M. Ch. Martin, ancien directeur de Mamirolle.
Microbiologie agricole............	M. Kayser, maître de conf. à l'Inst. agronomique.

V. — GÉNIE RURAL

Machines agricoles, 2 vol......... *Moteurs agricoles*................	M. Coupan, répétiteur à l'Institut agronomique.
Constructions rurales............	M. Danguy, direct. des études à l'École de Grignon.
Arpentage et Nivellement........	M. Muret, professeur à l'Institut agronomique.
Drainage et Irrigations...........	M. Risler, directeur hon. de l'Institut agronomique. M. Wery, s.-directeur de l'Institut agronomique.
Électricité agricole..............	MM. H.-P. Martin et Petit, ingénieurs électriciens.

VI. — ÉCONOMIE ET LÉGISLATION RURALES

Économie rurale.................. *Législation rurale*................	M. Jouzier, professeur à l'École d'agriculture de Rennes.
Comptabilité agricole............	M. Convert, professeur à l'Institut agronomique.
Associations agricoles (Syndicats et Coopératives)................	M. Tardy, répétiteur à l'Institut agronomique.
Hygiène de la ferme.............	M. le Dr Regnard, dir. de l'Inst. agronomique. M. le Dr Portier, répétiteur à l'Inst. agronomique.
Le Livre de la Fermière..........	Mme O. Bussard.
Le Livre agricole des Instituteurs.	M. Charles Seltensperger.

ENCYCLOPÉDIE AGRICOLE
Publiée par une réunion d'Ingénieurs agronomes
SOUS LA DIRECTION DE G. WERY

HYDROLOGIE AGRICOLE

PAR

Frédéric DIENERT

DOCTEUR ÈS SCIENCES
CHEF DU SERVICE DE SURVEILLANCE LOCALE DES SOURCES DE LA VILLE DE PARIS
COLLABORATEUR ADJOINT A LA CARTE GÉOLOGIQUE
AUDITEUR AU CONSEIL SUPÉRIEUR D'HYGIÈNE

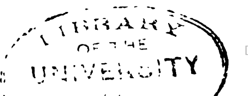
Introduction par le Dr P. REGNARD
DIRECTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE

Avec 3 cartes et 131 figures intercalées dans le texte.



PARIS
LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS
19, rue Hautefeuille, près du boulevard Saint-Germain

1907



INTRODUCTION

Si les choses se passaient en toute justice, ce n'est pas moi qui devrais signer cette préface.

L'honneur en reviendrait bien plus naturellement à l'un de mes deux éminents prédécesseurs :

A Eugène Tisserand, que nous devons considérer comme le véritable créateur en France de l'enseignement supérieur de l'agriculture : n'est-ce pas lui qui, pendant de longues années, a pesé de toute sa valeur scientifique sur nos gouvernements et obtenu qu'il fût créé à Paris un Institut agronomique comparable à ceux dont nos voisins se montraient fiers depuis déjà longtemps?

Eugène Risler, lui aussi, aurait dû, plutôt que moi, présenter au public agricole ses anciens élèves devenus des maîtres. Près de douze cents ingénieurs agronomes, répandus sur le territoire français, ont été façonnés par lui : il est aujourd'hui notre vénéré doyen, et je me souviens toujours avec une douce reconnaissance du jour où j'ai débuté sous ses ordres et de celui,

proche encore, où il m'a désigné pour être son successeur (1).

Mais, puisque les éditeurs de cette collection ont voulu que ce fût le directeur en exercice de l'Institut agronomique qui présentât aux lecteurs la nouvelle *Encyclopédie*, je vais tâcher de dire brièvement dans quel esprit elle a été conçue.

Des Ingénieurs agronomes, presque tous professeurs d'agriculture, tous anciens élèves de l'Institut national agronomique, se sont donné la mission de résumer, dans une série de volumes, les connaissances pratiques absolument nécessaires aujourd'hui pour la culture rationnelle du sol. Ils ont choisi pour distribuer, régler et diriger la besogne de chacun, Georges Wery, que j'ai le plaisir et la chance d'avoir pour collaborateur et pour ami.

L'idée directrice de l'œuvre commune a été celle-ci : extraire de notre enseignement supérieur la partie immédiatement utilisable par l'exploitant du domaine rural et faire connaître du même coup à celui-ci les données scientifiques définitivement acquises sur lesquelles la pratique actuelle est basée.

Ce ne sont donc pas de simples Manuels, des Formulaires irraisonnés que nous offrons aux cultivateurs; ce sont de brefs Traités, dans lesquels les résultats incontestables sont mis en évidence, à côté des bases scientifiques qui ont permis de les assurer.

Je voudrais qu'on puisse dire qu'ils représentent le véritable esprit de notre Institut, avec cette restriction qu'ils ne doivent ni ne peuvent contenir les discus-

(1) Depuis que ces lignes ont été écrites, nous avons eu la douleur de perdre notre éminent maître, M. Risler, décédé, le 6 août 1905, à Calèves (Suisse). Nous tenons à exprimer ici les regrets profonds que nous cause cette perte. M. Eugène Risler laisse dans la science agronomique une œuvre impérissable.

sions, les erreurs de route, les rectifications qui ont fini par établir la vérité telle qu'elle est, toutes choses que l'on développe longuement dans notre enseignement, puisque nous ne devons pas seulement faire des praticiens, mais former aussi des intelligences élevées, capables de faire avancer la science au laboratoire et sur le domaine.

Je conseille donc la lecture de ces petits volumes à nos anciens élèves, qui y retrouveront la trace de leur première éducation agricole.

Je la conseille aussi à leurs jeunes camarades actuels, qui trouveront là, condensées en un court espace, bien des notions qui pourront leur servir dans leurs études.

J'imagine que les élèves de nos Écoles nationales d'agriculture pourront y trouver quelque profit, et que ceux des Écoles pratiques devront aussi les consulter utilement.

Enfin, c'est au grand public agricole, aux cultivateurs, que je les offre avec confiance. Ils nous diront, après les avoir parcourus, si, comme on l'a quelquefois prétendu, l'enseignement supérieur agronomique est exclusif de tout esprit pratique. Cette critique, usée, disparaîtra définitivement, je l'espère. Elle n'a d'ailleurs jamais été accueillie par nos rivaux d'Allemagne et d'Angleterre, qui ont si magnifiquement développé chez eux l'enseignement supérieur de l'agriculture.

Successivement, nous mettons sous les yeux du lecteur des volumes qui traitent du sol et des façons qu'il doit subir, de sa nature chimique, de la manière de la corriger ou de la compléter, des plantes comestibles ou industrielles qu'on peut lui faire produire, des animaux qu'il peut nourrir, de ceux qui lui nuisent.

Nous étudions les manipulations et les transformations que subissent, par notre industrie, les produits de la terre : la vinification, la distillerie, la panification, la fabrication des sucres, des beurres, des fromages.

Nous terminons en nous occupant des lois sociales qui régissent la possession et l'exploitation de la propriété rurale.

Nous avons le ferme espoir que les agriculteurs feront un bon accueil à l'œuvre que nous leur offrons.

Dr Paul Regnard,
Membre de la Société nationale d'Agriculture de France,
Directeur de l'Institut national agronomique.

PRÉFACE

Bien que l'agriculture utilise les eaux superficielles en même temps que les eaux souterraines, nous nous sommes surtout, dans ce livre, occupé de ces dernières. Toutefois nous n'avons pas passé sous silence les eaux qui circulent à la surface du sol quand il s'est agi de parler de leur qualité, de leur captage ou de leur amélioration afin de les rendre utilisables.

L'*origine et la circulation des eaux souterraines* constitue la première partie de notre hydrologie. Nous avons montré, avec le concours si précieux dans certains cas de la spéléologie ou science des cavernes, de quelle manière ces eaux circulent.

Mais quand il s'agit d'étudier une source dans un pays quelconque, la spéléologie ne donne pas toujours des indications suffisantes. C'est pourquoi, dans une deuxième partie, intitulée *hydrologie spéciale* nous avons indiqué les méthodes utilisées pour l'étude de la recherche et de la circulation de ces eaux souterraines.

La troisième partie traite de la *qualité des eaux* en général. On constatera la brièveté des chapitres qui traiteront de la qualité industrielle ou agricole de ces eaux. Ils ont été traités dans d'autres livres de l'*Encyclopédie*. Je citerai, entre autres, le livre de M. Cord sur

la *géologie agricole* qui doit bientôt paraître ; le livre de MM. Risler, mon regretté maître et Wery, *Irrigations et drainages*; ceux de MM. Boullanger (*Industries de fermentations : Brasserie*), Warcollier (*Cidrerie*), et Saillard (*Technologie agricole*).

Nous nous sommes étendus surtout sur la qualité hygiénique des eaux superficielles et souterraines.

Le *captage des eaux tant souterraines que superficielles* était assez important pour constituer une quatrième partie. Cette question n'est traitée dans ce livre qu'au point de vue général. Tout ce qui a trait aux détails de construction est laissé de côté.

Enfin toutes les eaux ne sont pas utilisables à l'état naturel. Il est quelquefois nécessaire de les *traiter par un procédé physique, chimique ou biologique*, afin de leur enlever des défauts qui leur nuisent. D'autre part il faut évacuer les eaux après les avoir utilisées sans qu'elles soient nuisibles. Pour ce dernier chapitre j'ai trouvé des renseignements précieux dans les recherches expérimentales poursuivies par M. Calmette à Lille. Je le remercie particulièrement d'avoir mis plusieurs gravures de son livre à ma disposition.

Cette cinquième partie constituait le complément indispensable de notre hydrologie puisqu'elle permet l'emploi à tous les usages domestiques et industriels de presque toutes les eaux trouvées dans la nature.

Nous espérons avoir montré, dans ce livre, l'état actuel de la science hydrologique, ses méthodes et ses résultats.

Ce qu'on sait de nos richesses aquifères souterraines est bien peu comparé à ce qu'il nous reste à apprendre. Peut-être, en trouvant réunies dans ce petit livre, les méthodes rationnelles employées dans ces études, plusieurs de nos lecteurs se trouveront-ils attirés vers cette science si pratique et si captivante.

Les lois que nous avons essayé de dégager de quelques résultats obtenus jusqu'ici, gagneront beaucoup à être contrôlées à nouveau par de multiples expérimentateurs. L'hydrologie est en effet une science d'observation pour laquelle on ne saurait trop recommander la prudence dans la généralisation prématurée des résultats obtenus. Nous n'avons cependant pas hésité à rapporter ces lois ici pour deux motifs : d'abord parce qu'elles nous ont guidé et nous dirigent encore dans nos recherches. Les conclusions que nous avions déduites, en les prenant pour base, se sont très souvent trouvées vérifiées au-delà de nos espérances.

D'autre part nous estimons qu'une science ne peut progresser utilement que si elle s'appuie sur quelques lois que les recherches futures vérifieront ou modifieront.

En physique, en chimie, en biologie, on opère ainsi, pourquoi en serait-il autrement en hydrologie ?

Ces lois doivent principalement servir à tirer des conclusions de faits observés et à combiner des expériences. Les résultats de celles-ci, seuls démontreront la véracité du raisonnement et des lois appliquées.

Nous avons indiqué les points où, le plus généralement, on rencontre de l'eau en assez grande quantité. Beaucoup d'autres courants souterrains échappent encore à notre connaissance. Les recherches hydrologiques peuvent seules arriver, à la longue, à découvrir ces trésors aquifères.

En attendant, un grave problème se pose dans beaucoup de régions : comment obtenir une grande quantité d'eau potable ?

A la suite de beaucoup d'autres auteurs nous soulevons ce problème. Comme M. Duclaux, notre très regretté maître, nous faisons appel, tant pour la qualité que pour la quantité des eaux à se procurer, à la solidarité des habitants d'une région. Nous devons lutter contre

la nature, car isolés nous sommes impuissants, unis nous pouvons remporter sur elle quelques victoires.

Puisse ce livre engager de bonnes volontés dans la voie de l'expérimentation en hydrologie afin d'obtenir l'utilisation rationnelle de nos richesses aquifères souterraines. Peut-être contribuera-t-il à propager cette idée qu'une eau abondante et de très bonne qualité pour une région, ne peut être obtenue que si tous les habitants se réunissent afin de ne pas éparpiller inutilement leurs efforts.

Pour terminer j'adresserai un souvenir ému à mes regrettés maîtres Risler et Duclaux. Ce dernier principalement a guidé mes premiers pas dans la science hydrologique, et la fécondité des résultats tient, en grande partie, aux conseils éclairés qu'il voulut bien me donner.

F. Dienert.

30 mars 1907.



HYDROLOGIE AGRICOLE

PREMIÈRE PARTIE

HYDROLOGIE GÉNÉRALE

I

DE L'EAU

Utilité de l'eau. — Nous ne saurions nous passer d'eau. Sans elle les animaux, les végétaux et parmi eux les infiniment petits ne pourraient vivre. Partout où il y a de l'eau, la végétation est luxuriante, le pays est riche, la population est généralement nombreuse, tandis que là où elle est peu abondante, le pays est aride et la population très clairsemée. Là où elle manque, c'est le désert.

E. Blanc (1) signale le contraste excessif qui existe entre l'extrême fertilité des oasis et la stérilité du désert au milieu duquel elles se trouvent. La composition du sol n'a aucune influence sur cette fertilité ; et dans le Nefzaoua méridional le terrain sablonneux est très fertile grâce à la présence de l'eau, tandis qu'entre Gabès et Gafsa, des terrains plus riches et argileux restent stériles faute d'eau.

On peut donc dire que l'eau attire l'homme et tout ce qui constitue la vie. Si par un moyen quelconque elle

(1) E. Blanc, *Associat. avanc. sciences*, 1889, p. 867.

venait à disparaître brusquement de la terre, les êtres vivants disparaîtraient avec elle.

L'agriculture réclame de l'eau pour tous ses besoins et le problème se pose souvent de connaître les moyens les plus économiques pour en obtenir une grande quantité. Dans toutes les installations agricoles, l'eau est nécessaire pour la nourriture des animaux et du personnel, pour le lavage et le nettoyage. Dans ces conditions il faut rechercher la quantité et la qualité et nous verrons par la suite les moyens d'investigation et de recherches dont on dispose à cet effet.

Lorsqu'à la ferme est adjointe une industrie agricole telle qu'une sucrerie, une laiterie, une distillerie, une féculerie, une brasserie, ou un chai, l'abondance de l'eau devient une condition primordiale du bon fonctionnement de ces industries.

En dehors de la ferme et des industries annexes l'eau est nécessaire aux cultures. Pendant les périodes sèches certaines plantes comme les betteraves et la pomme de terre se trouvent bien d'un apport d'eau sous forme d'irrigations. Ces dernières sont obligatoires dans la culture maraîchère et pour l'entretien des prairies. Or l'hydrologie permet, dans certaines circonstances, soit de découvrir des eaux facilement utilisables pour l'irrigation, soit d'augmenter la quantité des eaux qui s'écoulent déjà naturellement.

Quantité d'eau. — L'agriculteur a donc besoin d'une certaine quantité d'eau. Lorsque favorisé par les circonstances, il peut découvrir dans le sol un courant souterrain ; il disposera d'une quantité d'eau plus que nécessaire à tous ses besoins. Doit-il chercher à l'utiliser entièrement? *A priori* il semble rationnel de ne pas l'épargner, mais deux sortes de considérations sont à envisager. Les premières sont d'ordre économique. En effet, l'eau doit être pompée dans la majorité des cas ; d'où une dépense qui demeure sans profit si l'eau est gâchée. Bien entendu

quand l'élévation de l'eau a lieu au moyen d'un moulin à vent, les frais sont minimes.

La seconde question est celle des eaux employées ; elles ne s'évaporent pas en totalité dans l'atmosphère et, ayant été utilisées elles doivent être éliminées. Or il est un principe de droit qui défend à chacun de nuire à son voisin.

Quand un agriculteur veut se débarrasser de ses eaux usées en les envoyant dans le sol par le moyen si simple du puisard, il risque fort de contaminer les eaux dont se sert son voisin, et souvent même celles dont on fait usage.

En posant le problème de l'alimentation en eau de son entreprise, l'agriculteur devra examiner et l'approvisionnement en eau et son évacuation. C'est pourquoi on ne peut installer une industrie agricole en n'importe quel endroit, si même celui-ci est bien pourvu en eau.

Dans une ferme on compte au moins par personne 2 litres d'eau pour la boisson, 2 à 4 litres pour la cuisson des aliments et la toilette ordinaire, 13 litres environ pour le lavage de linge. Il faut également 50 à 100 litres par cheval, bœuf ou vache, 8 à 15 litres par veau, mouton, porc, 40 à 50 litres pour le lavage des voitures, 1^{lit},5 à 6 litres par mètre carré d'allée et de cour.

Quant aux industries agricoles, la quantité d'eau est variable selon leur importance.

Les grosses machines à vapeur sans condensation exigent au moins 20 litres d'eau par cheval et par heure, avec condensation il en faut jusqu'à 750 litres.

Les machines à gaz demandent 40 à 60 litres d'eau de refroidissement par mètre cube de gaz employé.

Les brasseries consomment 500 litres par hectolitre de bière fabriquée, sans compter ce qu'il faut pour refroidir les caves et fabriquer la glace.

Les sucreries exigent 100 litres d'eau par kilogramme de sucre cristallisé fabriqué. La laiterie utilise jusqu'à

100 mètres cubes par jour pour une exploitation d'importance relativement minime (10 000 litres).

L'eau est nécessaire pour la fabrication du cidre et des piquettes.

Or, c'est au moment des sécheresses persistantes que l'agriculteur s'intéresse aux questions hydrologiques, et il est souvent trop tard. Les puits, construits sans aucune base scientifique, c'est-à-dire au hasard, ne donnent souvent pas d'eau au bout de quelques étés et l'exploitation est obligée d'assurer un service de ravitaillement en eau pour tout le personnel de la ferme et le bétail. On perd du temps et de l'argent à ce travail, de telle sorte qu'au point de vue économique l'opération est désastreuse.

Dans nos campagnes l'utilisation des eaux pour les différents besoins n'est pas toujours à l'abri de toute critique. Il existe des captations là où les sources sont abondantes et très faciles à prendre, mais dans beaucoup de points où la solidarité des habitants et de plusieurs communes est nécessaire pour aboutir à une utilisation pratique des eaux souterraines, chaque habitant est réduit à ses propres moyens. En Amérique, au contraire, on a compris depuis longtemps l'utilité des distributions d'eau dans chaque village et il n'est pas rare de trouver une colonne de distribution dans des localités de très faible importance.

Il est juste de dire que depuis quelques années les subventions de l'État, prélevées sur le *Pari mutuel*, ont donné un certain essor à l'amélioration de l'alimentation en eau des villages pour le plus grand bien des habitants et de leur hygiène.

Qualité des eaux. — C'est qu'en effet disposer de beaucoup d'eau est un bienfait. On a souvent constaté une diminution de la mortalité après la fourniture d'une plus grande quantité d'eau qui permet les grands nettoyages.

N'est-ce pas par de grands lavages qu'on arrive à débar-

rasser les locaux des germes qui les souillent après une maladie transmissible! Les hygiénistes mêmes admettent comme une mesure prophylactique suffisante le lavage des parquets à la brosse pour désinfecter les habitations après une des maladies qui entraînent la désinfection d'après la loi sur la santé publique, mais on ne peut opérer ainsi que lorsqu'on a à sa disposition une grande quantité d'eau.

La question de quantité résolue, il ne faudrait pas croire que l'eau soit potable parce qu'elle est sapide (ce qui dépend de sa minéralisation), fraîche et limpide.

Il faut aussi considérer sa pureté, et celle-ci n'est pas facile à discerner sans une étude approfondie. Or dans les campagnes cette question est très souvent laissée de côté. Il n'est pas rare, que le puits alimentaire soit entouré d'une auréole malodorante de fumier et de purins dont les infiltrations viennent souiller l'eau qu'on consomme.

Nos cultivateurs apprécient l'eau de source et il est assez difficile de leur faire admettre que celle-ci puisse être dangereuse. Et cependant les exemples abondent de contaminations et d'épidémies ayant l'eau comme origine. Ainsi la présence d'un cimetière directement au-dessus d'une source alimentant un village, est très dangereuse, car il suffit d'un typhique enterré là pour transmettre la maladie. Auxerre en a fait la triste expérience.

On connaît des exemples frappants où l'emploi de puits contaminés a favorisé la propagation de la fièvre typhoïde ou du choléra (à Lisbonne, par exemple). De même on a pu suivre à Rouen ou à Besançon des éclosions brusques d'épidémie de fièvre typhoïde due à l'arrivée rapide de germes jeunes et virulents provenant de typhiques, dans les sources qui servent à leur alimentation.

Dans certains cas, on a exagéré un peu le rôle que l'eau joue dans la propagation des maladies dites hydriques. Nous sommes sur ce point d'accord avec MM. Bodin,

Labit, Meynier, etc. Ce qu'il faut surtout éviter c'est l'introduction dans l'eau de germes jeunes et virulents provenant de malades atteints d'affections intestinales transmissibles, et nous englobons sous cette rubrique toutes les fièvres typhoïde, muqueuse, embarras gastriques, choléra et même les diarrhées. Si des obstacles viennent à arrêter le plus grand nombre de ces germes (on a vu à Altona qu'une simple filtration du sable a suffi pour arrêter le choléra qui dévastait Hambourg, alimentée également en eau brute de l'Elbe, contaminée en 1902 par les déjections de cholériques); les germes jeunes et virulents perdent de leur virulence et ne sont plus nuisibles. Certains même prétendent qu'ils sont utiles parce qu'ils vaccinent l'organisme et le mettent à l'abri des autres contaminations par d'autres moyens que l'eau. Au point de vue scientifique la chose est possible, mais non démontrée.

De même la santé des animaux, qui à la campagne prime souvent celle des gens, doit être prise en considération. Or, pour le cultivateur, tout est bon pour abreuver les animaux; aussi est-on tout étonné, au moment des épizooties, de voir la maladie continuer sa marche victorieuse malgré l'isolement des animaux. On a oublié qu'ils s'alimentaient à la même mare ou au même abreuvoir.

L'hydrologie ne doit donc pas se désintéresser de ces questions qu'elle a pour mission de résoudre. Non seulement son domaine s'étend aux eaux souterraines, mais encore aux eaux superficielles qui viennent parfaire l'appoint des eaux potables.

Or là encore les causes des contaminations des eaux sont multiples. Elles résultent des apports des déjections de toutes sortes qu'on dépose sur les bords des lits des ruisseaux, elles proviennent en outre des substances toxiques ou nuisibles que différentes industries envoient à la rivière.

MM. J. Ogier et Ed. Bonjean (1) citent à ce sujet : les fabriques de poudrettes, et d'engrais, les féculerie, teinturerie, tannerie, sucrerie, distillerie, papeterie, boyauderie, abattoir, équarrissage, industrie textile, poudrerie, buanderie, lavoirs, fabrique de soude, lavage de laines chapellerie, macération de bois, rouissage, fabrique de draps, lavage des peaux tannées, fabrique de couleurs d'aniline, etc.

Des eaux ainsi contaminées ne peuvent être employées pour l'alimentation, à moins de subir un traitement spécial que nous verrons par la suite.

Nous ne voulons pas pour l'instant nous étendre sur la relation qui peut exister dans certains cas entre certaines épidémies et l'eau, mais ce que nous pouvons dire dès à présent c'est que le remplacement de l'eau de puits ou de rivière par une canalisation d'eau potable a diminué considérablement la mortalité par la fièvre typhoïde et le choléra par exemple.

Pendant longtemps on a considéré que les eaux très minéralisées étaient nuisibles à la santé : M. Imbeaux, d'une part, MM. Ogier et Bonjean, d'autre part, ont montré que rien jusqu'ici ne justifie un pareil discrédit des eaux très chargées en sels. On boit des eaux minérales riches en sulfate de chaux sans être malade, pourquoi attribuer aux eaux potables très minéralisées une vertu nocive ?

Cependant les machines à vapeur, la cuisine, la brasserie demandent des eaux pauvres en chaux et en magnésie. On réclame des eaux claires et limpides pour la boisson ou pour l'irrigation de très jeunes pousses d'herbes, la laiterie, la brasserie demandent des eaux non contaminées. Une exploitation ne peut pas toujours avoir plusieurs catégories d'eau ; elle doit donc choisir celle qui répond le mieux à tous les besoins.

Il est assez difficile d'indiquer *a priori* la qualité qu'une

(1) J. Ogier et Ed. Bonjean, *Le sol et l'eau*, Traité d'hygiène de Brouardel et Mosny, 1906, p. 352.

eau doit remplir pour telle ou telle industrie agricole, à cause des techniques spéciales de fabrication. Quelquefois on trouve des coutumes inexplicables. Nous citerons, comme exemple, le cas de la Belgique qui, dans certaines brasseries, recherche les eaux contaminées pour faire de la bière ; tout le monde sait qu'on fait le cidre ou la piquette de préférence avec l'eau des mares. On ne voit trop pourquoi. Dans le pays on prétend bien que les eaux souterraines, sont trop dures, et cependant les eaux de mares, analysées par M. J. Clouet, sont loin d'être pauvres en chaux.

Voici ces analyses en grammes par litre :

	Bois-Guillaume près Rouen.	Epreville près Fécamp.
Ammoniaque	0,001	0,0035
Carbonate de chaux	0,539	0,975
Sulfate de chaux	0,212	1,326
— de potasse	0,067	0,026
Chlorure de sodium et de calcium	0,008	0,059
Carbonate de magnésie	0,019	0,021
— de fer	0,015	0,008
Azotate de potasse	0,009	0,007
— de chaux	traces	traces
Silice	0,026	0,060
Matières organiques	0,099	0,800
	0,995	3,2855

La définition d'une eau potable peut être la suivante :

Une eau devant servir à l'alimentation de l'homme ou des animaux doit être agréable au goût, sans odeur, limpide et de saveur agréable. Elle ne doit contenir aucune substance nuisible à l'organisme sain, ni germes dangereux. Enfin sa fraîcheur, qui la rend agréable doit être telle que la température oscille entre 6 et 14° dans nos climats tempérés.

Des différentes eaux. — Pour satisfaire tous ses besoins en eau l'homme peut récolter l'eau des pluies sur des surfaces planes, comme les toits et les murs, et

l'amener au moyen de tuyaux dans des réservoirs désignés sous le nom de citernes ; ou bien il peut s'adresser aux eaux souterraines comme les puits et les sources émissaires de ces eaux cachées. Enfin l'homme dispose d'eaux superficielles qu'il rencontre dans les rivières, les fleuves, les glaciers, les étangs et les mares. Les eaux de rivière, même quand elles sont à portée de l'agriculture, ne sont pas toujours utilisables.

Ces eaux chaudes en été, trop froides en hiver ne conviennent pas pour la laiterie par exemple, qui exige des eaux dont la température soit à peu près constante. Les eaux souterraines ou les eaux profondes des grands lacs sont les seules auxquelles l'industriel laitier pourra s'adresser, à moins qu'il n'ait un moyen facile et peu coûteux pour refroidir, en été, les eaux trop chaudes. Il est naturel d'utiliser le plus souvent possible les éléments à l'état naturel et de ne les transformer ou de les modifier que lorsqu'on ne pourra pas faire autrement. C'est que l'état naturel est le plus économique de tous. D'où cette si grande importance que revêtent les eaux souterraines qui, la plupart du temps, réunissent un certain nombre des qualités exigées dans l'usage courant et l'industrie. Par exemple ces eaux sont la pluaprt fraîches, limpides, inodores, peu chargées en sels minéraux, très agréables à la vue et au goût. Ces qualités suffisent très souvent ; aussi est-ce à elles principalement que l'on s'adresse à la campagne comme à la ville pour s'alimenter en eau. Sur les plateaux ce sont les seules qu'on puisse se procurer la plupart du temps.

Quand les eaux souterraines sont enfouies profondément dans le sol, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie pour les amener à la surface, d'où une dépense qu'on cherche à éviter le plus souvent possible en allant les prendre à leur sortie naturelle du sol, à l'émergence même qu'on appelle source. Cette manière d'opérer n'est pas toujours commode ; aussi M. Imbeaux recommande-t-il

dans ce cas les associations pour diminuer les frais de pompage des eaux souterraines.

Vu leur importance, l'hydrologie s'est surtout préoccupée de ces dernières eaux. Elle s'est attelée au difficile problème de la circulation souterraine, elle a cherché à prévoir les endroits cachés où l'eau peut se trouver dans le sol en abondance. Nous commencerons par l'étude de la circulation souterraine. de beaucoup la plus importante.

II

DU SOL AU POINT DE VUE GÉOLOGIQUE

L'hydrologie est une science qui s'appuie à chaque instant sur la géologie. Il est donc indispensable, avant d'entrer dans l'étude des eaux souterraines, de donner quelques notions indispensables de géologie afin de faire connaître ensuite, comment on doit lire une carte géologique, condition nécessaire quand on veut déterminer l'endroit où on peut rencontrer beaucoup d'eau pour la capter.

On admet qu'à son origine la Terre fut une nébuleuse qui progressivement se refroidit, et de liquide parvint à se solidifier à la surface. Cette croûte fût formée par les métaux les moins lourds entrant dans la composition de la terre, en particulier par les métaux alcalins et alcalino-terreux. Les terrains qui se constituèrent ainsi, formés de silicates plus ou moins riches en silice et en bases, sont désignés sous le nom de terrains primitifs. La nomenclature de ces terrains est assez longue : le granite, le gneiss, les micaschistes, etc., font partie de ces terrains.

La Terre continuant à se refroidir une fois ces terrains formés, il est arrivé un moment où l'eau, se trouvant primitivement à l'état de vapeurs, est venue se condenser à la surface du sol et où, en raison des inégalités de celle-

ci, elle s'est mise à ruisseler. Or l'action mécanique de ces ruissellements, ainsi que les effets successifs du gel et du dégel, ont amené la décomposition progressive de ces roches primitives avec formation de sables, argiles et, pour certaines roches, de mica.

Ces sables, argiles et autres particules, entraînés par les courants plus ou moins violents, sont allés se déposer dans les parties plus calmes où la vitesse de l'eau était insuffisante pour continuer à les déplacer.

Ces dépôts se sont formés très régulièrement et leur surface était sensiblement horizontale. Ils constituent ce

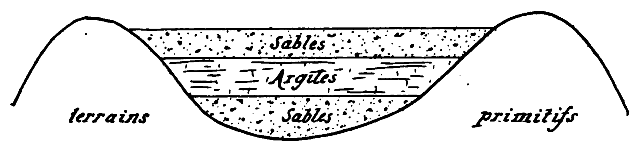


Fig. 1. — Formation de terrains sédimentaires.

qu'on appelle les *terrains sédimentaires*. Suivant les conditions des dépôts on peut, comme l'indique la figure 1, avoir une succession de dépôts de sables et d'argiles.

La Terre étant suffisamment froide, les éléments de la vie s'y développèrent. Suivant les époques vécurent alors dans la mer, les lacs ou les fleuves, différentes espèces d'animaux et de végétaux dont les parties constituantes furent plus ou moins riches en chaux, magnésie, bases alcalines ou silice.

Au fur et à mesure que ces animaux mouraient leurs parties minérales se déposaient au fond de l'eau et formaient des terrains calcaires, ou siliceux, ou argilo-calcaires, ou argilo-siliceux. Comme pour les sables ou l'argile la surface des couches était horizontale. Elles constituent encore des terrains sédimentaires. Certains dépôts, laissés par les grands fleuves de l'époque quaternaire, forment ce qu'on appelle des alluvions, celles-ci recouvrant très souvent une grande surface de terrains sédimentaires.

Pendant que se déposaient ces terrains sédimentaires et même encore à l'époque actuelle, la Terre, non encore refroidie en son centre, vomissait des roches en fusion désignées sous le nom de *roches éruptives*. Les basaltes. trachytes, andésites, etc. sont des roches éruptives qui ont recouvert en nombreux points les terrains sédimentaires. Ces roches ont coulé le long des vallées des terrains sédimentaires qu'elles ont totalement comblées, ce qui constitue une particularité intéressante pour les études d'hydrologie.

Quelquefois l'arrivée des roches éruptives a été incomplète, celles-ci ayant eu accès à travers une fissure quel-

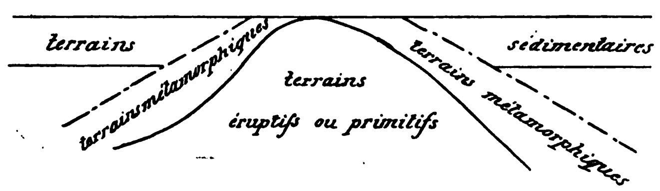


Fig. 2. — Formation des terrains métamorphiques.

conque dans les terrains sédimentaires (fig. 2) forment comme un mur dressé à travers ces terrains. Ces roches chaudes, riches en gaz, ont transformé les terrains sédimentaires voisins, leur ont donné un aspect cristallin spécial qu'on a désigné sous le nom de terrains *métamorphiques* ou *cristallophylliens*.

La roche devient schisteuse quand les éléments de l'argile sont alignés. Dans ces terrains cristallophylliens on rencontre à travers les couches d'argile de petits éléments cristallins formés par l'effet du métamorphisme et ces roches dures et fossiles sont appelées *schistes*. Les porphyroïdes, certains gneiss, certains marbres, les calcaires cornés, les phyllades sont des terrains de métamorphisme.

Enfin sous l'influence de pressions diverses ces terrains

sédimentaires se sont transformés également en terrains plus compacts avec des plans de clivage contribuant encore à la formation de schiste. Ces influences sont qualifiées de *dynamomorphiques*. C'est de l'ensemble de tous ces terrains, ayant une valeur très différente au point de vue de leur richesse en eau, que la Terre est formée.

La disposition de ces terrains n'est pas restée invariable depuis leur formation. L'horizontalité primitive ne s'est maintenue que dans de très rares occasions et la croûte terrestre est l'objet, depuis sa formation, de mouvements

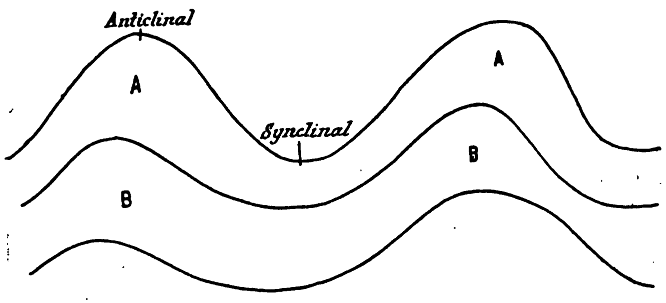


Fig. 3. — Plissement des couches.

très compliqués qui ont eu pour résultat de donner aux couches des terrains sédimentaires des allures très diverses que nous allons mentionner, et de permettre, à différentes époques, l'affleurement de terrains primitivement submergés, de même que la submersion d'autres parties de la Terre depuis longtemps émergées.

Le premier effet de ces soulèvements peut être représenté par la constitution de couches planes mais inclinées sur l'horizon suivant un certain angle.

Mais en outre de ces soulèvements réguliers il s'en est produit d'autres dus très probablement à des efforts de tassement de la croûte terrestre par suite du refroidissement, efforts qui se sont traduits par des plissements

(fig. 3). Lorsque les plis sont réguliers on a des ondulations comme celles représentées (fig. 3). La partie supérieure du pli forme ce qu'on appelle l'*anticlinal*, la partie inférieure est le *synclinal*. Souvent les plis sont penchés (fig. 4), de telle sorte qu'un terrain plus ancien comme B repose sur un terrain plus récent A, tandis

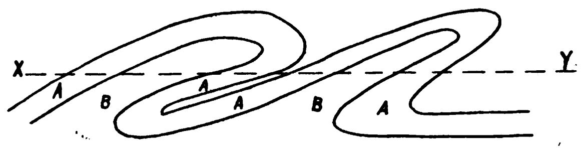


Fig. 4. — Plissement des couches.

qu'en général le terrain A repose sur le terrain plus ancien B parce qu'il s'est déposé le dernier.

Chaque tête supérieure de ces plis peut être arrasée quand, par suite d'un affaissement général des plis, les terrains sont submergés par la mer.

Si dans la figure 4 l'arrasement s'est fait suivant le plan XY, on a un dispositif représenté par la figure 5.

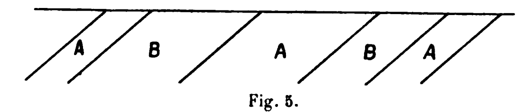


Fig. 5.

L'action des eaux peut même être telle que certains terrains sédimentaires ont complètement disparu (1).

Une nouvelle submersion entraîne très souvent le dépôt d'une nouvelle couche de terrains sédimentaires.

Les plans séparant deux terrains ou deux dépôts successifs d'un même terrain forment ce qu'on appelle des *plans* de *stratification*. La stratification est concordante quand les plans de stratification de deux terrains sont

(1) Quelquefois ces terrains mis à jour, sont recouverts d'autres terrains provenant de la décomposition de couches supérieures et de leur éboulement le long des pentes, formant ce qu'on appelle des *éboulis*.

parallèles comme à la figure 5. Elle est naturelle quand les dépôts ont conservé la position qu'ils

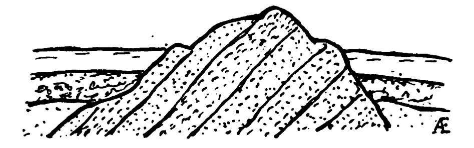


Fig. 6. — Discordance dans la succession des couches.

avaient au moment de leur formation.

Au contraire, si dans la figure 5 un nouveau terrain se dépose on a une stratification *discordante* (fig. 6) Enfin la stratification est *transgressive* quand, dans une stratification discordante, il y a non seulement discor-

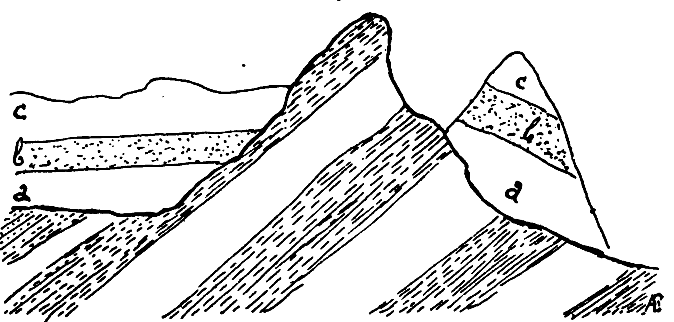


Fig. 7. — Stratification transgressive (d'après Auscher).

dance entre deux couches, mais encore dans la direction d'une même couche (fig. 7).

Or, en hydrologie, la direction des couches, leurs points de stratification, ont une importance considérable ; il est donc indispensable de connaître leur définition et de savoir les distinguer sur une carte géologique.

L'action des eaux et des conditions météorologiques contribuent à l'entamement des couches et à la formation

des vallées. Prenons le cas le plus simple, celui d'une stratification parallèle. Le creusement d'une vallée entraîne la mise à jour de couches plus profondes des différents terrains, comme il est représenté figure 8.

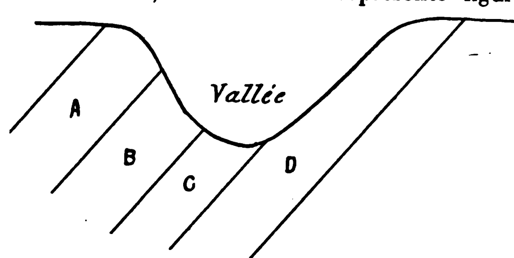


Fig. 8. — Creusement d'une vallée.

La vallée est *anticlinale* si elle est située au faîte de l'anticlinal d'un pli ; elle est *monoclinale* quand elle est sur la part inclinée d'un pli (fig. 9).

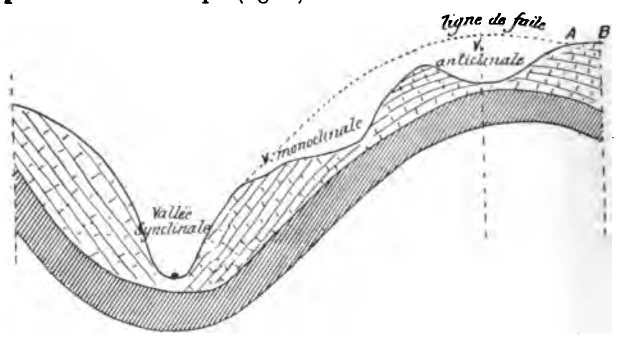


Fig. 9. — D'après P. Chalon.

Si la stratification est discordante, la formation d'une vallée entraîne encore la mise à jour des terrains cachés par les terrains sédimentaires plus récents et permet de constater la discordance de la stratification.

La figure 10 indique bien la mise à jour, à la suite du

creusement de la vallée, des terrains A, B, C, cachés primitivement par les terrains E et F.

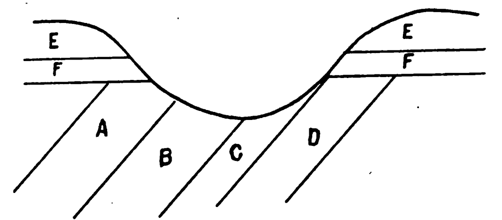


Fig. 10. — Stratification descendante. Mise à jour de terrains cachés.

Enfin il y a encore un accident qui permet une discordance très grande dans la succession des terrains sédimentaires et qui joue un très grand rôle dans la formation des sources, c'est la faille.

La *faille* est une rupture de l'écorce terrestre qui a permis le glissement de deux ou plusieurs terrains l'un contre l'autre, de façon à mettre directement en contact un terrain récent avec un autre beaucoup plus ancien.

La figure 11 représente l'exemple d'une faille dont les terrains supérieurs ont été arrasés.

Fig. 11. — Influence d'une faille.

Après avoir très rapidement et très succinctement indiqué les diverses situations qu'on peut rencontrer dans l'étude du sol, nous allons pouvoir aborder l'étude d'une carte géologique, de sa construction et de sa lecture (1).

Établissement d'une carte géologique. — Une carte géologique n'est autre, en France, qu'une carte

(1) Pour plus de détails, voy. De Launay, *La Science géologique*, chez Colin, Paris.

d'État-Major sur laquelle ont été représentés les différents terrains sédimentaires qu'on y rencontre.

La détermination des terrains constitue la géologie. On la subdivise en stratigraphie, paléontologie, pétrographie, sciences très difficiles qui ne s'acquièrent qu'avec beaucoup de temps et de pratique sur le terrain. Chaque terrain est caractérisé par les dépôts formés et par la flore et la faune qu'on y rencontre à l'état fossile. L'agriculteur connaît rarement assez de géologie pour se permettre de construire à lui seul une carte géologique. Nous n'indiquerons ici que la façon de l'établir, supposant à l'avance avoir affaire à un géologue de profession connaissant très bien le caractère des différentes couches et par conséquent sachant attribuer à telle ou telle formation les parties du sol qu'il rencontre. Les personnes qui veulent lire une carte géologique pour en tirer des conséquences hydrologiques doivent se contenter des indications de la carte elle-même. Mais pour en faciliter la lecture elles doivent savoir comment le géologue l'établit.

Le géologue a soin de gratter pour ainsi dire la surface de la terre arable qui représente une transformation récente et souvent très artificielle du sol, et c'est le terrain rencontré après ce grattage qu'il indique sur la carte en se servant de teintes conventionnelles. A chaque teinte est adjointe une lettre minuscule ou majuscule suivant les terrains, grecque pour les terrains primitifs, suivie souvent d'une caractéristique en chiffre romain ou d'un indice (prime, seconde, etc.), et très souvent encore de signes spéciaux qui constituent comme des renvois à la note explicative qui accompagne toujours une carte géologique. Ces différents signes sont nécessaires parce que la lettre représente le système géologique (nous verrons par la suite la division actuellement admise des différents systèmes géologiques). La caractéristique est celle de l'étage, quelquefois aussi celle du sous-étage, et comme celui-ci n'a pas une constitution uniforme par-

tout, on a soin d'y mettre un autre signe, souvent un chiffre, indiquant qu'en tel point le sous-étage est marneux, ailleurs sableux, plus loin calcaire.

Pour établir sa carte le géologue s'adresse aux carrières existantes, aux puits et également à des sondages qu'il fait quand les moyens naturels lui manquent.

Il est bien entendu qu'une carte géologique est un document essentiellement perfectible. Le géologue est obligé très souvent de conclure par extension et les limites qu'il indique n'ont pas une précision mathématique.

Il s'aide beaucoup de l'aspect extérieur des terrains et de leur pente. Nous verrons plus tard, aux signes extérieurs, l'aspect que revêt chaque terrain sédimentaire.

Après avoir noté l'emplacement des carrières, des usines et des endroits où on peut trouver des substances pour le chauffage, les arts céramiques et chimiques et pour la construction, le géologue dresse sa carte géologique en reportant sur la carte d'État-Major au 1/80000 les limites des terrains reconnus sur le terrain même.

Ainsi prenons par exemple la *feuille de Paris*, dans la région comprenant Gonesse, le Grand Tremblay et Mitry (fig. 12). La feuille indique que dans cette région on rencontre les terrains e^1, e^2, e^3, a^r, P (*e* représente la série éocène du système éogène).

L'étage e^1 est celui des sables de Beauchamps, la note explicative de la carte indique plusieurs horizons sans grand intérêt au point de vue hydrologique.

L'étage e^2 est le travertin de Saint-Ouen, terrain calcaire avec très souvent intercalation de couches très minces argileuses.

L'étage e^3 est celui du gypse.

a^2 représente les alluvions modernes.

Enfin P^p est le limon des plateaux qui recouvre la plupart des formations.

Dans une carte géologique, ce qui est important au point de vue hydrologique c'est la direction générale des

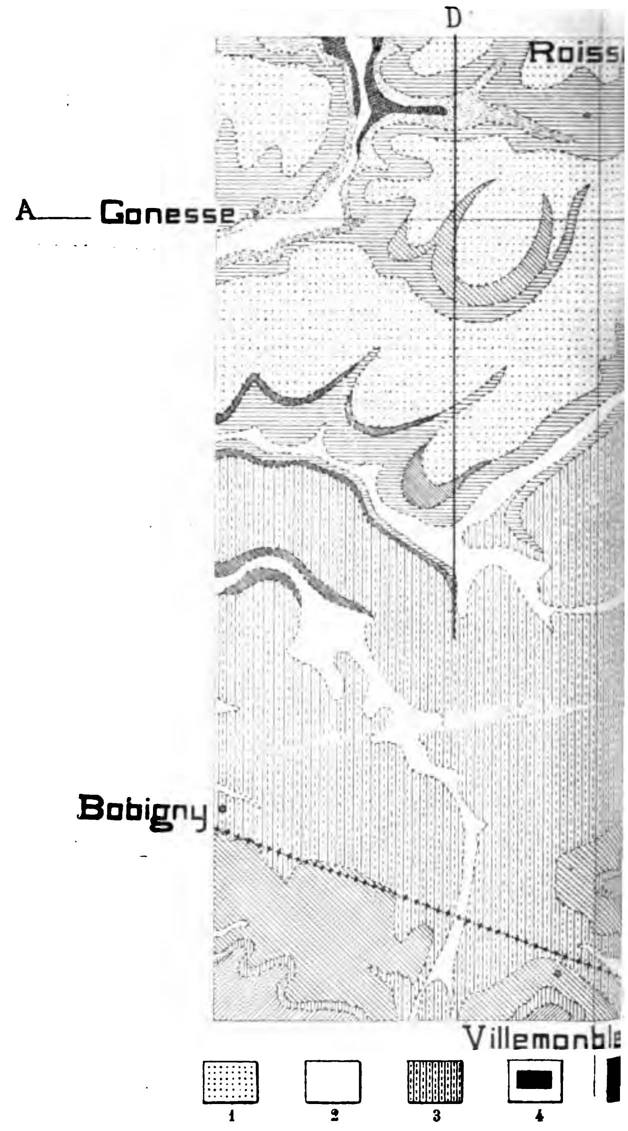


Fig. 12. — Feuille géol

1. P, limons des plateaux; 2. a^2, alluvions mode
Fontainebleau ; 5. $m_{\prime\prime\prime}a$, marnes et calcaires siliceux
Champigny ; 8. e^2, travertin de Saint-Ouen ; 9, e^1, sa

(1) Les couleurs conventionnelles ont été remplacé
géologiques sont en couleur.

Mitry — B

Gd Tremblay



6 7 8 9 10

e de Paris, région de Gonesse, Mitry (1).

; 3. *a* I, sables et graviers anciens ; 4. *m*″, sables et grès de Brie ; 6. $m_{\prime\prime\prime b}$, marnes et glaises vertes ; 7. e^3, marnes et gypses de le Beauchamp ; 10. $e_{\prime}$, calcaire grossier à cérithes.

ır des hachures variables suivant les terrains, mais toutes les cartes

couches. Pour commencer on peut faire sur le papier une représentation graphique des terrains rencontrés, avec un peu d'habitude on arrive assez facilement à se représenter mentalement la direction générale des couches.

Généralement deux sections verticales, perpendiculaires l'une sur l'autre, sont nécessaires pour se rendre compte de la direction des terrains. Traçons une ligne sur notre carte partant de Mitry et aboutissant à Gonesse. Reportons sur notre papier tous les endroits où cette ligne rencontre les limites assignées sur la carte aux différents terrains.

D'autre part, établissons le relief du sol en s'aidant des cotes de la carte géologique. C'est souvent là ou gît la plus grande difficulté, car si on peut, dans certains cas, suivre la pente du sol d'après les hachures de la carte d'État-Major, la besogne n'est pas toujours très commode en terrain assez peu accidenté. On doit regretter l'absence d'un plus grand nombre de cotes sur les cartes géologiques, ce qui en faciliterait la lecture aux personnes peu habituées à se livrer au travail assez compliqué de la reconstitution du relief du sol au moyen des hachures de la carte.

Quoi qu'il en soit, le relief du sol entre Mitry et Gonesse est représenté par la figure 13.

Sur ce relief on note les points d'affleurement des différents terrains et, dans l'exemple que nous donnons, il suffit de joindre les points d'affleurement par des lignes parallèles pour avoir la superposition des différentes couches (1). On voit que la pente générale de celles-ci est dirigée de Mitry vers Gonesse.

Une coupe perpendiculaire à cette ligne Mitry-Gonesse, faite du nord au sud, laissant à l'est Roissy et à l'ouest

(1) Dans certains endroits les lignes de séparation des différents terrains sont légèrement sinueuses. La notice explicative de la carte géologique indique sous la rubrique : *Observations stratigraphiques* les remarques faites à ce sujet par le géologue.

Gonesse (fig. 14), établie suivant la même méthode que plus haut, montre que la direction générale des couches se relève vers le nord, mais beaucoup plus que dans notre coupe E. W.

Fig. 13. — Coupe verticale, allant de Mitry à Gonesse.

Le *pendage* des couches est l'inclinaison de ces couches par rapport au plan horizontal. On l'obtient très facilement en s'aidant de la géométrie descriptive. La figure 15 représente la façon de rechercher cette ligne de pente qui est très sensiblement dirigée suivant les directions NNE, SSW.

Généralement les anticlinaux et les synclinaux ainsi que les failles sont indiqués sur les cartes géologiques. Un pli synclinal est représenté par une ligne formée

de croix (+++++) et un pli anticlinal par une ligne d'x (×××××), les failles par deux traits parallèles très rapprochés ou par un gros trait. Pour reproduire l'allure des couches géologiques, on peut donc s'aider de ces indications. Un pli anticlinal ou synclinal est perpendiculaire au pendage des couches.

D'autre part, les contours des couches ne sont pas tracés de la même façon. Quand le contour est assez bien déterminé, ses limites sont représentées par une série de traits interrompus (— — — — — —). Quand ce sont des limites un peu fictives on intercale un point entre chaque

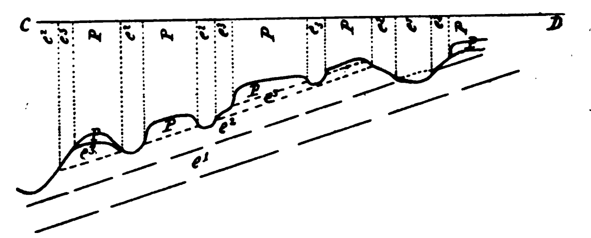


Fig. 14. —Coupe verticale entre Gonesse et Roissy.

trait (— . — . — . —). Enfin quand les limites sont cachées on se sert d'une série de points (. . . . . . .).

Sur notre carte on peut apercevoir le synclinal passant près de Bobigny dont la direction est très sensiblement perpendiculaire à la ligne de pente que nous avons indiquée plus haut.

La lecture de la carte géologique est plus difficile quand on a affaire à des terrains primitifs et primaires très fortement redressés avec superposition, dans une certaine partie de la carte, de couches sédimentaires à stratification discordante.

La stratification presque verticale est reconnue le plus souvent par les sondages des mines et est indiquée sur la carte dans la note explicative. Elle est excessivement

fréquente dans les terrains primitifs, mais elle a peu d'importance en hydrologie. Dans les cas semblables il est inutile de rechercher l'allure des couches géologiques représentées par de tels terrains.

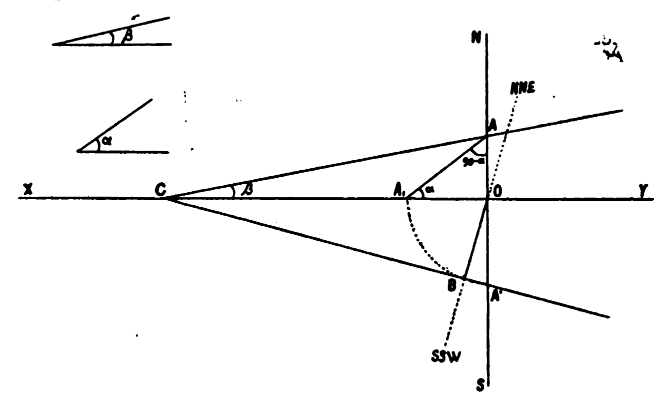


Fig. 15. — Détermination approximative de l'inclinaison d'une formation géologique.

Soit α l'inclinaison des couches entre Gonesse et Roissy ; β, l'inclinaison des couches entre Gonesse et Mitry.

Soit NS, la direction N.S. et XY, une ligne de terre perpendiculaire à NS.

En un point C de XY quelconque, on forme un angle ACO = β, qui rencontre la ligne NS en A. De ce point A, on tire la ligne AA_1 formant un angle = 90-α avec AO. A_1 est le point d'intersection de AA_1 avec XY. De O comme centre avec A_1O comme rayon, on trace une circonférence. Puis de C on mène une tangente à cette circonférence qui touche cette dernière en B. La ligne BO représente la direction de la ligne de plus grande pente des couches qui, en l'espèce, est sensiblement NNE, SSW. Si l'inclinaison des couches suivant la coupe CD, au lieu d'être N-S était au contraire S-N, le pendage des couches serait SSE-NNW, c'est-à-dire symétrique par rapport à la ligne NS.

Comme l'indique M. de Launay dans son article sur le sol, étude géologique (1), il ne faut pas croire que ces quelques notions suffisent pour se dire géologue et modifier les quelques erreurs trouvées sur une carte géologique. Mais elles servent toutefois à pouvoir lire une

(1) *Traité d'hygiène* de MM. Brouardel et Mosny, fasc. II, 1906.

carte géologique et à tirer de ses indications quelques notions absolument indispensables à la recherche des eaux souterraines, comme nous le montrerons par la suite.

Nous donnons pour terminer le tableau chronologique des terrains sédimentaires tel qu'il est extrait de la *Science géologique*, par L. de Launay.

Ce tableau n'est pas très nécessaire pour lire une carte géologique. La superposition des terrains est indiquée dans la note explicative, qui commence toujours par les terrains les plus récents pour finir aux terrains les plus anciens et n'emploie pas les termes indiqués dans ce tableau. Cependant, comme nous aurons l'occasion de parler de la plupart des terrains sédimentaires, il est utile de les trouver réunis, par ordre de superposition, dans un tableau d'ensemble.

III

DE L'ORIGINE DES EAUX SOUTERRAINES

Si pendant longtemps la question de l'origine des eaux souterraines fut du domaine de la fantaisie, on constate que déjà au XVI[e] siècle, on commençait à se faire quelques idées assez exactes sur ce sujet. Palissy (1) admet qu'elles sont dues à l'infiltration dans le sol des eaux pluviales, arrêtées dans leur mouvement de descente par une roche compacte ou l'argile.

Cette opinion, admise actuellement, ne le fut pas par la plupart des contemporains de Palissy. Descartes (2), par exemple, donne une théorie tout à fait différente :

« Sous les montagnes, il y a de grandes cavités remplies d'eau que la chaleur élève continuellement en vapeurs.

(1) PALISSY (BERNARD), *Discours admirables de la nature des eaux et des fontaines*. Paris, 1580.

(2) DESCARTES, *Principes de philosophie*, Paris, 1724.

Ces vapeurs se glissent par tous les pores de la terre, et parviennent jusqu'aux plus hautes superficies des plaines et des montagnes où elles produisent les fontaines dont les eaux, coulant sur le pendant des vallées, s'assemblent, forment des rivières et descendent à la mer. Dans la terre, il y a plusieurs grands passages, par lesquels il va autant d'eau de la mer vers les montagnes, qu'il en sort des montagnes et retourne à la mer. Le cours de l'eau dans la terre imite celui du sang dans le corps des animaux, où il passe sans cesse et rapidement des veines aux artères et des artères aux veines. »

Il est à remarquer que dans son exposé, Descartes ne fait pas intervenir l'évaporation de l'eau, ni les pluies, ce sont pour lui phénomènes accessoires et négligeables comparés aux infiltrations de la mer.

Mariotte (1) revient à la théorie de Bernard Palissy et appuie celle-ci d'une observation journalière.

« Il y a des carrières en plusieurs endroits dont le haut est en forme de voûte, et il n'y a que vingt ou trente pieds de terre au-dessus, où l'on peut remarquer que les petits égouts d'eau qui s'y font, passent par de petites fentes entre les lits de pierre et qu'ils procèdent des pluies, parce qu'ils ne durent que quinze jours ou trois semaines après qu'il a cessé de pleuvoir; et on peut facilement juger que les autres écoulements des fontaines se font de la même sorte. »

L'observation de Mariotte, très facile à faire par tous ceux qui ont l'occasion de visiter ou de parcourir une carrière souterraine, montre d'une façon évidente que les pluies peuvent être une origine des eaux souterraines dans les terrains observés. L'augmentation de ces infiltrations après une pluie, leur disparition au moment des sécheresses, et cela sans exception, constituent une preuve irréfutable.

(1) Mariotte, *Traité des mouvements des eaux*, Paris, 1686.

Tableau chronologique
(extrait de *La Science*

Groupe I.	PRIMAIRE OU								
Systèmes.	PRÉCAMBRIEN		SILURIEN					DÉVO	
Étages.	1 Précambrien ou Algonkien.		2 Cambrien (Faune primordiale).			3 Ordovicien (Faune première).	4 Gothlandien ou Bohémien (Faune seconde).	5 Gédinnien.	6 Coblentzien.	7 Eifélien.
Sous-étages.	Huronien.	Keweenawien.	Géorgien.	Acadien.	Postdamien.					

Groupe II.	SECONDAIRE OU														
Systèmes.	TRIASIQUE			JURASSIQUE											
				1° Série liasique ou infra-jurassique.					2° Série médio-jurassique.		3° Série				
Étages.	17 Werfénien ou Vosgien ou Scythien.	18 Virglorien ou Dinarien (Muschelkalk).	19 Tyrolien et Juvavien (Keuper).	20 Rhétien.	21 Hettangien.	22 Sinémurien.	23 Charmouthien ou Liasien.	24 Toarcien.	25 Bajocien.	26 Bathonien.	27 Callovien		28 Oxfordien.	
Sous-étages.											Inférieur	Divésien.	Neuvizyen	Argovien.

Groupe III.	TERTIAIRE OU								
Systèmes.	ÉOGÈNE (Nummulitique méditerranéen								
	1° Série éocène.						2° Série oligocène.		
Étages.	41 Thanétien.	42 Sparnacien	43 Yprésien.	44 Lutétien.	45 Bartonien.	46 Ludien ou Priabonien.	47 Tongrien.		48 Aquitanien.
	(Suessonien)			(Parisien.)					
Sous-étages							Sannoisien.	Stampien.	

…es terrains sédimentaires
…éologique par L. De Launay).

…ALÉOZOIQUE

…IEN			CARBONIFÉRIEN			PERMIEN		
8 Givétien.	9 Frasnien	10 Famennien.	11 Dinantien (Culm.)	12 Moscovien ou Westphalien.	13 Ouralien ou Stéphanien.	14 Artinskien ou Autunien.	15 Penjabien ou Saxonien (Rothliegende).	16 Thuringien (Zechstein).

…ÉSOZOIQUE

			CRÉTACIQUE								
…PRA-JURASSIQUE			1° Série infra-crétacée				2° Série supra-crétacée.				
29 Séquanien.	30 Kimeridgien.	31 Portlandien.	32 Néocomien.	33 Barrémien.	34 Aptien	35 Albien (Gault)	36 Cénomanien.	37 Turonien.	38 Emschérien ou Sénonien infér.	39 Aturien ou Sénonien supér.	40 Danien.
Rauracien, Astartien.	Ptérocérien, Virgulien.	Bononien, Berriasien ou Purbeckien ou Aquilonien.	Valanginien, Hauterivien.	Rhodanien.	Bedoulien, Gargasien			Ligérien, Angoumien.	Coniacien, Santonien	Campanien, Maestrichtien.	

…ÉOZOIQUE

NÉOGÈNE										
1° Série miocène.					2° Série pliocène.			3° Série pléistocène.		
49 Burdigalien.	50 Helvétien.	51 Tortonien.	52 Sarmatien.	53 Pontien.	54 Plaisancien.	55	56 Sicilien	57 Age de l'Elephas antiquus (climat chaud).	58 Age de l'Elephas primigenius (faune de toundras).	59 Age du Renne (Cervus tarandus) (faune de steppes).
								Ces trois périodes se fondent l'une dans l'autre et se pénètrent mutuellement.		

2.

Avant de montrer comment se fait cet apport d'eau à la nappe souterraine, nous signalerons, pour y revenir, dans un paragraphe spécial, que l'école allemande a une certaine tendance à diminuer l'importance des infiltrations d'eaux pluviales et prétend que l'origine des eaux souterraines serait due à la condensation de l'humidité de l'air atmosphérique pénétrant dans l'intérieur du sol.

La théorie du Dr Vögler, chef de cette école, explique ainsi l'alimentation des sources.

A partir d'une profondeur de 15 à 20 mètres environ, le sol est à une température invariable. A la profondeur de 25 mètres environ elle représente environ la moyenne de la température du lieu et au-dessous elle croît en raison de 1° pour 30 à 40 mètres de profondeur.

Or, en été, la température de l'air est plus élevée que celle du sol. L'air atmosphérique qui pénètre dans le sol se refroidit et condense son humidité dans son intérieur. En hiver c'est l'inverse, l'air est à une température plus basse que le sol et vient refroidir l'air du sol et condenser plus facilement la vapeur d'eau qui y est contenue.

D'autre part, le sol rayonnant la chaleur plus facilement que l'air, se refroidit plus la nuit que ce dernier, d'où condensation, qui du reste semble être reprise le jour par l'évaporation.

Cette théorie, que nous examinerons plus loin en détail, n'est qu'une modification de celle de Descartes. En effet, au lieu d'admettre que l'humidité provient de l'évaporation de l'eau de la mer dans l'intérieur du sol sous l'influence de la chaleur terrestre, il suffit d'envisager l'évaporation de cette même eau dans l'atmosphère sous l'influence du soleil. D'après la théorie actuelle, cette eau, à l'état de vapeur, descend dans le sol, au lieu de remonter comme le voulait Descartes, et ici encore le cycle est fermé.

La question de l'origine des eaux a une importance sur leur qualité. Considérons la première théorie qui

attribue l'origine des eaux souterraines à l'infiltration des eaux pluviales à travers le sol. Quand, après leur chute, elles ont rencontré la surface de la terre, elles y ont trouvé des germes plus ou moins suspects, comme celui de la fièvre typhoïde, déposés par des typhoïsants malades ou convalescents. Ces germes sont entraînés avec les eaux infiltrées et pourront contaminer la nappe inférieure. Au contraire, si c'est l'air humide seul qui pénètre dans l'intérieur de la terre, les germes suspects ne sont pas entraînés et ne viennent pas souiller les nappes souterraines. Au point de vue de l'hygiène, il serait à souhaiter que ce dernier mode d'alimentation des nappes souterraines fût le plus répandu.

Pour aborder ce problème, nous allons étudier d'abord les causes de la pluie et montrer la façon dont elles se répartissent une fois tombées à la surface du sol. L'hydrologie tirera de ces premières notions quelques conséquences importantes.

Causes de la pluie. — Lorsqu'une masse d'air chargée de vapeur d'eau se refroidit, il se forme de la pluie.

Le refroidissement peut tenir à la rencontre de deux courants opposés venant de régions à température différente, mais il résulte également de la détente produite par un mouvement ascendant de cette masse d'air humide.

L'air se charge de vapeur d'eau après avoir été en contact un certain temps avec une étendue d'eau suffisante; pour qu'il y ait détente, il faut que le vent rencontre un relief montagneux, ou la surface d'une forêt. Elle peut se produire encore grâce à des différences de température (mouvement ascensionnel de l'air chaud et sa substitution par un courant froid).

Aussi suivant les localités trouve-t-on des quantités d'eau tombées très variables. On ne recueille guère que $0^m,20$ d'eau par an dans les régions désertiques, et, au contraire, 12 à 14 mètres sur les flancs de l'Himalaya.

Même en France, la quantité d'eau varie suivant les régions et M. Angot (1) a montré par une carte la répartition de ces pluies.

D'après M. Millot, on peut diviser la France en deux zones : l'une dite subtropicale avec pluies d'hiver, de printemps et d'automne, pas ou peu de pluies en été. Elle s'étend jusqu'au 45° de latitude.

L'autre à pluies à peu près également réparties en toutes saisons et s'étendant, au nord du 45° de latitude. On y constate toutefois une légère prédominance des pluies d'été.

Voici, d'après M. Angot, comment la France reçoit pour ainsi dire ses pluies. « En janvier et février, le continent européen étant plus froid que la mer, les principales chutes de la pluie se font immédiatement sur les premières zones du littoral, et l'intérieur est protégé relativement ; en mars, la pluie commence à diminuer sur les côtes et pénètre plus avant dans le continent, jusqu'aux montagnes ; puis le mouvement s'accentue dans ce sens dans les mois suivants, et, en été (juin et juillet), c'est le nord et le centre de l'Europe qui reçoivent le plus d'eau, tandis que le sud et l'Espagne (en raison de la chaleur intense qui éloigne l'air du point de saturation) restent secs. Un mouvement inverse, c'est-à-dire un recul de la zone des pluies vers le midi et l'ouest, commence en août et s'accentue en septembre ; en octobre, le régime des pluies cycloniques reparaît, car pendant ce mois où la mer est encore très chaude, le continent se refroidit et condense facilement les vapeurs abondantes de vents marins ; enfin en novembre et décembre, la pluie diminue en même temps que la température sur la plus grande partie de l'Europe et elle se concentre sur les côtes occidentales. »

En France, il pleut beaucoup plus sur les massifs montagneux que sur les plaines.

(1) ANGOT, *Traité élémentaire de météorologie.*

Lorsque les vents pluvieux remontent les vallées, la quantité d'eau augmente; si ces mêmes vents coupent une vallée peu large, il ne tombe aucune pluie.

La région de la Beauce semble être une région de pluie minima, il pleut un peu plus dans la Brie.

A Paris, il pleut plus l'été que l'hiver. Aussi sur une hauteur d'eau de 514 millimètres, 205 appartiennent à la saison froide et 309 à la saison chaude. Toutefois ces dernières pluies ne profitent guère aux cours d'eau ni aux réservoirs souterrains. En raison de la température élevée elles s'évaporent facilement et retournent à l'atmosphère.

Répartition des eaux de pluie dans un sol sableux. — L'eau de pluie tombée à la surface du sol tend à s'évaporer, car malgré les chutes d'eau, l'air n'est jamais saturé d'humidité. L'intensité de l'évaporation est d'autant plus grande que l'hygromètre marque un chiffre de beaucoup inférieur à 100°. La pluie peut donc être reprise facilement par l'atmosphère et, en été principalement, le soleil aidant, l'évaporation est très active. Le vent facilite encore cette évaporation parce qu'elle permet l'élimination de l'air humide et son remplacement par de l'air sec. Cette évaporation se continue dans le sol jusqu'à une certaine profondeur.

Le facteur évaporation dépend, d'après M. Worée, de la nature du sol, de sa capacité d'absorption par l'eau et de la difficulté qu'il éprouve à se dessécher, de l'inclinaison des coteaux, de la nature de la végétation qui recouvre le sol, de la violence des vents et de leur degré d'humidité.

D'après M. Worée, un pré est capable d'évaporer 1,200 à 1 800 millimètres d'eau, un terrain marécageux 639 millimètres, une surface liquide de 600 à 1 050, une terre labourée 600 millimètres, un terrain saturé d'eau 409 millimètres, un sol drainé 507 millimètres, une forêt à surface peu couverte 159 millimètres, une forêt à surface couverte 70 millimètres.

En outre de l'évaporation par le sol, il faut noter l'évaporation par les plantes. Celles-ci participent pour une grande part à ce phénomène, l'évaporation facilitant chez elles la circulation de la sève à travers leurs vaisseaux.

Les grands arbres arrêtent l'arrivée de la pluie jusqu'au sol de leurs feuilles. La quantité d'eau ainsi arrêtée et rapidement évaporée est évaluée à 15 ou 18 p. 100 de l'eau tombée.

L'évaporation par les plantes est importante, mais, comme MM. Debauve et Imbeaux le signalent dans leur livre, il ne faut pas oublier que les plantes évaporent surtout en raison de la quantité d'eau qui est mise naturellement ou artificiellement à leur disposition.

D'après Hales, Wollny, Schleiden, Haberlandt, Vogel, Schubler, Hartig, Höhnel, la quantité d'eau évaporée par les différentes végétations est comprise entre 10 et 40 millimètres d'eau pendant la période de végétation.

M. King (1) admet que dans les sables et les terrains argileux l'eau pouvant pénétrer rapidement à une profondeur suffisante, qu'il évalue à $2^{m},50$, est soustraite définitivement à l'évaporation du sol nu ou des plantes. Cette profondeur est toutefois très variable et il est bien évident que pour se rendre compte de la proportion des eaux qui, dans chaque terrain, reste acquise à la nappe il faudrait d'abord déterminer la profondeur à partir de laquelle l'eau est définitivement soustraite à l'action évaporante de l'atmosphère et des plantes. C'est un travail très coûteux et de longue haleine que M. d'Andrimont a réclamé au dernier congrès international des mines et de géologie appliquée de Liége, en 1905.

Ce qui n'est pas évaporé est acquis par le sol.

Pour commencer prenons un terrain formé de sable. Le premier phénomène constaté est une absorption

(1) M. King, *Principles and conditions of the movements of ground water* (*Nineteenth annual Report of the U. S. Geological Survey*, part. II. « *Papers chiefly of a theoretical nature.* » Washington, 1899.

plus ou moins rapide de l'eau par le sable qu'on peut faire dépendre de deux facteurs. Le premier est ce qu'on désigne sous le nom de *capacité*, c'est-à-dire le pouvoir que possède une couche de conserver en elle une certaine quantité d'eau (définition de MM. Debauve et Imbeaux) désignée par Schubler sous le nom d'hygroscopicité. Dans les sables cette capacité est très sensiblement celle des espaces lacunaires. Elle leur est toutefois supérieure avec des grains excessivement fins.

Si le sable était formé de grains arrondis et d'égal volume, l'espace laissé libre entre les grains varierait de 47,64 p. 100 à 25,95 p. 100 du volume total, suivant le mode d'empilement et serait indépendant du volume même des grains de sable.

Cependant un sable est loin d'être homogène, il y a des grains plus fins et d'autres plus gros. Dans les espaces libres viennent s'intercaler de petits grains qui diminuent la proportion théorique calculée. C'est pourquoi King a trouvé que pour les sables mélangés l'espace libre est inférieur à 26 p. 100. Les sables homogènes à grains arrondis de dimensions moyennes donnent une proportion d'espaces vides égale à 37 p. 100. La quantité d'eau qui occupe ces vides représente très sensiblement la capacité du sable.

Le second facteur désigné par les uns *perméabilité*, par MM. Debauve et Imbeaux *conductibilité*, est la propriété qu'a le sol de se laisser traverser par une quantité de liquide. La rapidité d'absorption dépendra de la conductibilité des couches qui permet la vidange des couches supérieures, aux dépens des couches inférieures. Elle sera, d'après Wollny, d'autant plus rapide, que le sable est plus gros, et on peut dire qu'en général la conductibilité est d'autant plus grande que la capacité est plus petite. C'est même pour ce motif que l'argile, formée de grains excessivement petits, a une grande capacité et une conductibilité presque nulle.

Si on étudie plus à fond le phénomène de l'absorption de l'eau par le sable, on remarque qu'il est excessivement plus complexe qu'on ne pourrait le croire *à priori*.

Un certain nombre d'obstacles s'oppose à l'enfouissement des eaux.

L'eau peut en effet suivre deux chemins différents pour s'engouffrer dans le sol. Le plus souvent elle ruisselle à la surface des grains, retenue à ceux-ci par une force adhésive ayant quelque analogie avec la force capillaire qui se manifeste dans la teinture (fig. 16). Si on prend un grain de sable bien sec A, et qu'on verse sur celui-ci une goutte d'eau, on constate que cette dernière entoure le grain A d'une gaine liquide plus ou moins adhérente. L'adhérence est même telle qu'au fur et à mesure que le grain mouillé est soumis à l'évaporation, l'eau l'abandonne de plus en plus avec difficulté. Cette force adhésive est proportionnelle à la surface des grains. Or à poids égaux, la surface d'une masse de sable est d'autant plus grande que le diamètre de ces grains est plus petit. On s'explique ainsi pourquoi la dessiccation d'une masse de grains de sable très fin est plus difficile que celle d'une masse de grains de sable plus gros.

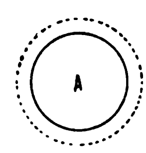


Fig. 16. — Grain de sable entouré de sa pellicule d'eau.

Pour que l'eau puisse passer d'un grain supérieur au grain inférieur de façon à gagner la nappe souterraine, il faut que celui-là se soit chargé d'une certaine dose d'humidité qu'on constate fort bien quand on prend un tube rempli de sable de Fontainebleau. On verse de l'eau à la partie supérieure, le sable blanc prend un aspect gris. Si la quantité de liquide est insuffisante, on distingue très nettement la partie humide grise de la partie sèche qui reste blanche. L'eau ne descend plus. Elle ne reprend sa marche descendante qu'au moment où on renouvelle un apport d'eau à la surface du tube.

Cette eau pelliculaire sera animée d'un certain mouvement de haut en bas et pourra conduire dans les profondeurs les eaux de pluie infiltrées.

Toutefois si la vitesse d'écoulement à travers cette nappe est insuffisante, l'eau va remplir les vides que les grains de sable laissent entre eux et il se déclarera un autre écoulement capillaire différent du mouvement *pelliculaire*. L'ensemble de ces deux mouvements constitue ce qu'on appelle la conductibilité.

L'obstacle ici est double. Il résulte de la petitesse des canaux et de l'air que contiennent les pores du sable. L'eau ne pourra remplir ceux-ci qu'après en avoir chassé tous les gaz, créant alors des courants d'air qui remontent à la surface du sol par quelques endroits assez bien limités qui empêchent en ces points la descente de l'eau. Hoffmann a nettement démontré que les eaux infiltrées dans les sables suivent des cheminées verticales distinctes de celles suivies par l'air.

Le sable demeure toujours plus sec en ces points jusqu'au moment où, tout l'air étant chassé, ces parties se mouillent comme les autres.

D'après M. Spring, l'imbibition d'un sable sec a lieu jusqu'à ce que l'air expulsé d'entre les grains par le liquide ait atteint une certaine pression dont la grandeur dépend essentiellement de la constante capillaire du liquide et de la présence du sable. *Toutefois l'arrêt de l'imbibition n'empêche pas le mouillage général des grains de sable.*

D'Andrimont (1) a donné les lois suivantes qui semblent régir l'écoulement de l'eau à l'état superficiel ou pelliculaire dans les terrains qu'elle imbibe.

« I. L'épaisseur de la couche superficielle recouvrant les particules du terrain diffère d'un endroit à un autre ; elle peut varier de zéro à une épaisseur maximum, qui est celle de la sphère d'activité moléculaire. Lorsque cette

(1) D'Andrimont, *L'alimentation des nappes aquifères* (*Annales de la Société géologique de Belgique*, t. XXXI).

épaisseur est atteinte, il se forme une couche d'eau perceptible.

II. Le mouvement imbibitif est toujours dirigé des zones où cette couche est la plus épaisse, vers la zone où elle est moins épaisse.

III. Les couches d'eau à l'état superficiel sont soumises à la pesanteur qui tend à les faire descendre.

Il résulte de ces lois que, si un terrain est imbibé par le bas, la hauteur d'ascension est limitée. En effet, la force imbibitive étant constante et la pesanteur agissant sur une masse d'eau de plus en plus considérable, les deux actions tendent à se contrebalancer.

Lorsqu'au contraire, un terrain est imbibé par le haut, ces deux actions agissent dans le même sens et la descente de l'eau peut se continuer indéfiniment.

L'action imbibitive se manifestera lorsque l'épaisseur de la couche superficielle n'est pas uniforme ; elle se manifestera donc, *a fortiori*, lorsqu'un terrain sera mis en relation avec une zone imbibée capillairement.

L'écoulement capillaire de l'eau est d'autant plus lent que les vides laissés entre les grains de sable sont plus petits, mais, toutes choses égales d'ailleurs, l'eau s'acheminera d'autant plus rapidement dans le sol que la colonne d'eau à sa surface sera plus grande.

Quand l'épaisseur de sable dépasse 10 mètres environ, la vitesse d'écoulement capillaire est indépendante de la charge qui s'exerce à sa surface.

Les pluies ont souvent pour effet de modifier l'arrangement des sables et l'importance des vides, surtout de la partie supérieure du sol, d'où une diminution de la capacité.

La chaleur augmente l'infiltration et on s'en aperçoit pratiquement dans les filtres à sable, comme nous aurons l'occasion de le montrer par la suite.

La congélation du sol diminue et même annule

l'infiltration. En Sibérie, au nord du cercle polaire, les sources cessent de couler pendant l'hiver.

Mais si au commencement un sol sec absorbe plus d'eau qu'un sol humide, il arrive forcément un moment où la quantité d'eau qui tombe est supérieure à celle qui s'infiltre.

Quand le sol est horizontal l'eau reste stagnante et son absorption se continuera encore quand la pluie aura cessé de tomber. L'évaporation se manifestera ici pour une part assez importante.

Mais si le sol est en pente, l'eau non absorbée suivra la déclivité et constituera ce qu'on appelle les eaux de ruissellement.

Le ruissellement augmente quand l'averse est plus forte ou plus prolongée parce qu'à ce moment la vitesse d'infiltration ou bien ne croît pas assez vite pour absorber l'eau qui tombe, ou bien diminue au fur et à mesure que le sol se trouve plus humecté d'eau.

Le ruissellement dépend de beaucoup de conditions : l'orographie et la nature géologique du sol, l'état de la surface (cultivée, boisée, en jachère, gelée, saturation du sol), l'intensité de l'averse et de sa durée. Ainsi Debauve a montré que, dans le bassin très déclive et imperméable de la Durance, la fraction de ruissellement était de 0,18 à 0,27 pour les crues moyennes et de 0,33 à 0,42 pour les crues exceptionnelles.

M. Landa a trouvé 0,42 pour le Danube à Vienne, en temps de crue exceptionnelle.

D'autre part, le *Geological Surwey* aux États-Unis a montré que, toutes choses égales d'ailleurs, la proportion d'eau de ruissellement est liée à la durée des pluies. Ce qu'ils appellent le *run off* ou la proportion d'eau qui sort d'un bassin orograpqique par ruissellement, après les pluies emportée par les ruisseaux et les fleuves, ne dure que un à deux jours si la pluie reste comprise entre quinze et vingt jours. Au contraire, il se manifeste pen-

dant trente jours quand il tombe soixante jours de pluie.

Belgrand, qui a étudié dans le bassin de Paris l'infiltration des eaux dans les différents sols, a constaté que dans ce bassin, pour qu'il y ait ruissellement, il faut que les terrains sableux ou calcaires aient une pente de 5 p. 100 (1).

L'absorption est totale si la pente est moindre.

Tous ces phénomènes, évaporation, ruissellement, infiltration sont sous la dépendance les uns des autres et il demeure évident qu'il est assez difficile de les évaluer avec une approximation suffisante. On se contente le plus souvent de prendre une moyenne très approximative que nous indiquerons plus loin.

Certaines réactions chimiques comme dans la formation des hydroxydes, absorbent une certaine quantité d'eau qui échappe aux nappes souterraines.

Répartition des pluies sur différents sols. — Nous avons montré ce qui se passe dans un terrain sableux

(1) Belgrand a fait dans la forêt de Fontainebleau une expérience intéressante pour démontrer que la capacité d'absorption des sables était très grande. Belgrand désirait connaître la superficie à acquérir pour créer, dans la forêt de Fontainebleau, une décharge à l'aqueduc des eaux de la Vanne qui traverse cette forêt. Il choisit une des vallées les plus écartées, au delà d'Arbonne.

Un barrage avait été établi à 840 mètres de la décharge pour créer un lac d'eau limpide. Ce barrage s'élève à $3^m,26$ au-dessus des points bas du sol. Un peu à l'aval, se trouvait une source à l'affleurement des marnes vertes. Il y avait à cet endroit 2 mètres de sable et au-dessous quelques assises de calcaire de Brie.

L'eau, dont le débit était de 250 litres à la seconde, mit deux jours pour parcourir les 860 mètres qui la séparait du barrage, et ceci malgré la pente rapide de la vallée. L'air renfermé dans le sable s'échappait en produisant d'énormes bouillonnements à la surface de l'eau.

L'expérience dura du 15 mai au 5 juin et, pendant tout ce temps, l'eau n'atteignit guère qu'une moyenne de 1 mètre d'épaisseur et cela, sur à peine 1 hectare.

Le sable était capable d'absorber dans cette expérience une hauteur d'eau de $2^m,79$ par jour, c'est-à-dire une quantité considérable.

Les plus fortes pluies connues dans nos régions donnent $40^m/^m$ d'eau à l'heure, soit $0^m,96$ en vingt-quatre heures, elles peuvent donc être absorbées complètement et rapidement par le sol, si la pente est inférieure à 5 p. 100.

formé de particules assez petites et sensiblement homogènes. Ce que nous avons dit à ce sujet va nous permettre de passer facilement aux autres terrains.

La *capacité*, dans les terrains autres que les sables (1), mesure plus que le volume total des espaces lacunaires. Pour une même substance cette capacité varie suivant le degré de finesse et de tassement.

D'une substance à une autre elle varie avec la densité et avec la tendance particulière à l'agglutination avec l'eau. On trouve :

Eau retenue par le sable...	25 à 60	p. 100
Par le sol calcaire.........	27	—
— la glaise et l'argile....	40 à 70	—
— le terreau............	190	—

Voici, d'autre part, quelques chiffres donnés par P. Chalon (2) :

100 kil. de terre tourbeuse, après dessiccation à l'air, peuvent retenir............	85kg eau
100 kil. terre argilo-siliceuse, après dessiccation à l'air, peuvent retenir...........	70kg —
100 kil. terre calcaire, après dessiccation à l'air, peuvent retenir..................	45kg —

A l'état compact :

		Eau en m³.
1m³ de craie peut absorber...		0,200
1m³ grès	— ...	0,050 à 0,100
1m³ calcaire	— ...	0,004 à 0,005
1m³ granite	— ...	0,025 à 0,005

Delesse avait trouvé les chiffres suivants qui montrent la différence entre la roche en fragments et celle en poudre.

(1) Certains auteurs font une distinction entre l'eau *dite d'imbibition ou de carrière*, qui se trouve dans l'intérieur même des roches, et l'eau de remplissage des vides. Le terme général de capacité englobe, dans son ensemble, ces deux sortes d'eau.

(2) P. Chalon, *Recherche des eaux souterraines*, p. 48.

	En fragments (parties d'eau).	En poudre.
100 parties de craie peuvent absorber.	24	41
100 — de schistes noirâtres peuvent absorber....................	2,85	36
100 parties de gypse peuvent absorber..............................	2,20	26
100 parties de grès quartzeux fin...	0,66	»
100 — de marbre gris..........	0,08	17
100 — de granite amphibolique.	0,06	27

Les grès, les calcaires qui forment les roches sont donc capables d'absorber une certaine quantité d'eau d'imbibition avant de laisser ruisseler à leur surface une goutte d'eau. Le grès, formé de grains de sable fins agglutinés entre eux, est assez poreux et s'imbibe bien mais lentement ; la finesse de son grain l'empêche généralement d'absorber assez vite une proportion d'eau un peu forte, telle qu'une forte averse, et la fraction de la pluie qui ruisselle dans les pays grèseux est encore très notable.

Mais ils sont le plus généralement sillonnés par de petites fissures qui forment des solutions de continuité entre les roches. L'eau d'imbibition s'introduit dans le grès comme à travers les grains de sable, avec cette différence qu'il y a une cohésion entre les grains qu'on ne retrouve pas dans le sable. Une fois que la roche est complètement imprégnée, une goutte d'eau déposée à la surface du sol entraîne la mise en liberté d'une goutte à la partie inférieure. Dans ces terrains la circulation a lieu par déplacement, exactement comme M. Schlœsing l'a démontré pour les sables (1).

Il ne faut pas oublier que le sol n'est pas entièrement nu et qu'il existe à sa surface une couche plus ou moins épaisse de mousse, gazon, feuilles mortes, etc. Cette

(1) L'expérience de M. Schlœsing a été faite de la façon suivante : il prend une allonge contenant 1kg,200 de sable lavé et séché qu'il mouille avec 200 centimètres cubes d'une solution de sel marin contenant 10 milligrammes de chlore par centimètre cube.

Ceci fait, il fait arriver à la partie supérieure un débit d'eau distillée de

couche a une capacité d'absorption qui lui est propre et généralement très grande ; on comprend alors que le ruissellement soit considérablement ralenti, là où cette couverture est épaisse. L'infiltration de l'eau dans le sol y est modérée ou tout au moins retardée.

La conductibilité des sols fissurés est plus grande généralement que dans les sables.

Les grès des Vosges sont très peu fissurés. Les grès de Fontainebleau le sont au contraire beaucoup.

Par les fissures l'écoulement est bien plus facile parce que leurs dimensions sont plus grandes que les espaces lacunaires des sables. Dans le cas de la figure 17 la goutte d'eau *a* éprouve un certain frottement de la part des deux parois et devra vaincre la force capillaire, mais sur deux faces seulement. En outre, quand la fissure s'agrandit comme dans la figure 18, la goutte d'eau n'est plus adhérente qu'à une seule paroi et son écoulement sera plus facile encore.

Par conséquent dans les grès fissurés l'absorption des eaux pluviales sera bien plus grande que dans les sables. L'air n'est presque plus ici un obstacle parce que les gouttelettes d'eau peuvent y circuler sans être obligées de

40 centimètres cubes par heure et le liquide chassé de l'allonge est recueilli par lots de 10 centimètres cubes.

De trois en trois lots on dose le chlore et on trouve :

	3 lots.	6 lots.	9 lots.	12 lots.	15 lots.	18 lots.	24 lots.	27 lots.
Chlore p. 1000.	100,2	99,8	99,8	100	100	84	8	0

On retrouve ainsi les trois quarts de la quantité de chlore ajouté à peu près de même concentration que la solution primitive. M. Schlœsing explique ainsi le résultat de cette expérience.

On peut diviser l'allonge en une série de couches transversales. Quand une couche d'eau distillée a baigné la surface de l'allonge, elle se mélange avec la première couche qu'elle rencontre et se charge ainsi de sel. La deuxième couche rencontrée sur laquelle s'exerce une pression échange également avec cette couche de nouvelle concentration une certaine proportion de sel marin, mais se dilue moins que la première couche et ainsi de suite jusqu'au moment où la dilution ne peut pas pratiquement se faire sentir, et on récolte à la fin de l'eau simplement chassée et remplacée par la couche d'eau immédiatement supérieure. Il se fait donc comme un déplacement vertical, l'eau supérieure venant remplacer l'eau de la couche inférieure qui est chassée.

le chasser pour prendre sa place. Dans ces conditions si la circulation pelliculaire existe elle est réduite à son minimum.

Dans les grès il y a deux circulations : l'une à travers les pores de la roche elle-même, ressemblant à celle des terrains sableux, l'autre, à travers les fissures des grès et identique à la circulation des eaux à travers les roches compactes et fissurées comme les calcaires, les gneiss, les basaltes, les serpentines, les trapps. Les grès forment donc la transition entre les sables et les roches compactes

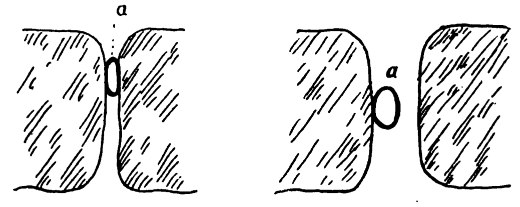


Fig. 17. — Circulation d'une goutte d'eau à travers une fine diaclase.

Fig. 18. — Circulation d'une goutte d'eau à travers une large diaclase.

fissurées. L'eau que ces roches peuvent contenir dans leurs pores contribue très peu à l'alimentation de la nappe sous-jacente, mais nous verrons plus tard son influence sur la composition des eaux souterraines.

Les fissures sont souvent mixtes, c'est-à-dire comblées en partie par des sables ou des cailloux. La circulation y est alors moins facile, mais généralement ces terrains de remplissage laissent des espaces lacunaires très lâches qui n'opposent qu'un très faible obstacle au cheminement des eaux.

D'autres fois les débris remplissant les diaclases sont légèrement argileux et forment alors un tel obstacle à la circulation des eaux que celle-ci y est plus difficile que dans les sables.

L'argile pure, lorsqu'elle est sèche, peut se mettre en

poudre, mais elle est avide d'eau et se gonfle quand elle s'en imprègne. On dit alors qu'elle foisonne. C'est l'avidité de l'argile pour l'eau qui la rend à peu près imperméable. Nous la considérons actuellement à la surface du sol, nous verrons plus loin l'argile dans la profondeur du sol.

M. P. Pichard, directeur de la Station agronomique de Vaucluse, a montré qu'une terre argileuse ou argilo-calcaire s'imbibe d'eau très difficilement ; au contraire, une terre argilo-silicieuse est beaucoup plus perméable. Voici ce qu'il a trouvé :

	Compositions de terres.		Durée de l'imbibition totale d'une couche de terre ayant 50^{mm} d'épaisseur.
I.	Argile grasse de Béllone..........		55 jours.
II.	—	30	45 —
	Sable calcaire palpable........	70	
III.	Argile........................	20	42 —
	Calcaire palpable.............	80	
IV.	Argile........................	30	36 —
	Calcaire impalpable...........	15	
	— palpable.............	55	
V.	Argile........................	20	20 jours.
	Calcaire impalpable...........	25	
	— palpable.............	55	
VI.	Argile........................	30	16 —
	Silex impalpable..	15	
	— palpable.....	55	
VII.	Argile........................	20	8 —
	Silex impalpable.............	30	
	— palpable.................	50	
VIII.	Argile........................	10	5 —
	Silex impalpable.............	40	
	— palpable.................	50	
IX.	Argile........................	10	6 —
	Calcaire impalpable...........	90	
X.	Argile........................	10	8 heures.
	Silex impalpable.............	90	

Sur ces terrains argileux ou argilo-calcaires la proportion d'eau qui profite à la nappe sera très faible, il y aura beaucoup d'eau de ruissellement. Ce sont de très mau-

vais terrains pour avoir de grandes quantités d'eau à sa disposition. S'ils contiennent de l'eau, ceci tient à ce qu'ils sont généralement recouverts de débris de roches perméables, comme nous le verrons par la suite. Il en sera de même dans les roches massives et compactes imperméables, à l'eau comme la plupart des granits et des porphyres, les roches granitiques et granitoïdes (syénites, protogines, diorites, gneiss, etc.), les schistes cristallins et métamorphiques, certains grès à grains très fins, la craie verte ou glauconieuse, les dolomies liasiques et permiennes, certains sables très fins, les quartz et quartzites, les calcaires très compacts, certaines roches sédimentaires lorsque leur stratification est horizontale ou peu inclinée, et en général toutes les roches non fissurées ou fendillées, celles que Chalon (1) appelle roches adiaclasiques.

La quantité d'eau qu'un sol peut absorber est donc très difficile à évaluer. MM. Debauve et Imbeaux (2) résument sous cette forme les causes de la complexité du problème, qui tiennent :

« 1° A ce que le sol n'est pas constitué d'ordinaire d'une seule couche homogène et ayant des pores d'un calibre fixe, mais bien d'une superposition de couches différentes, variables d'un point à un autre et comprenant des pores, des fissures et des cavités de dimensions le plus souvent inconnues, et en tout cas très diverses ;

2° A ce que l'état de réplétion partielle de ces voies, fissures et cavités varie à tout instant, suivant la succession et l'intensité des pluies, le débit des sources, les prélèvements dus à l'évaporation superficielle, à la transpiration des plantes, etc. ;

3° A ce que la quantité d'eau qui s'infiltre dépend essentiellement de la durée de contact entre l'eau tombée

(1) Chalon, *L'art de découvrir les sources*, p. 61-62.

(2) Debauve et Imbeaux, *Assainissement des villes. Distribution d'eau*, t. II, p. 51.

et le sol et que cette durée dépend, à son tour, de la configuration de la surface (notamment de son inclinaison) ainsi que de l'abondance et de la durée de la précipitation ;

4° Enfin à ce que certains changements modifiant l'état de la première couche et de la surface (tels que les alternatives de gel et de dégel, le labourage, la croissance ou la dispersion de la végétation etc.) font varier également l'infiltration dans des proportions parfois très considérables. »

Si on vient à couper le sol par un plan vertical, on trouvera à la partie supérieure une zone où l'humidité du sol sera très variable, suivant les pluies et où les phénomènes d'évaporation peuvent se faire sentir, au-dessous est une zone où l'évaporation ne se fait plus sentir, mais dont l'humidité dépend de l'arrivée plus ou moins rapide de l'eau de la surface. Enfin, à la base, une couche saturée d'eau.

Toutes les fois qu'il y a obstacle à l'absorption rapide des eaux, celles-ci s'évaporent et ruissellent, comme nous l'avons vu pour les sables.

Coefficient d'absorption des eaux de pluie. — Malgré l'incertitude où nous sommes de déterminer exactement dans tous les cas la proportion des eaux de pluie pouvant rejoindre la nappe, nous sommes obligés de rechercher, au moins dans certains cas particuliers, le coefficient d'absorption qu'on peut employer, coefficient qui nous sera, comme on le verra, d'une très grande utilité.

L'expérience très intéressante que Risler a faite dans son domaine de Callèves (canton de Vaud) va nous donner un premier renseignement sur ce sujet.

Le domaine de Callèves est formé d'une terre argilo-siliceuse, reposant sur un sol argileux imperméable. Cette terre était très bien drainée, ce qui permettait de récolter, à travers les tuyaux de drainage, l'eau qui, s'étant infiltrée dans le sol, n'avait pas été évaporée par le sol et les plantes, ainsi que les eaux de ruissellement.

On pourrait objecter dès maintenant que l'eau récoltée pouvait avoir, comme dans la théorie de Descartes, une origine souterraine par suite de la condensation de la vapeur d'eau dans les parties froides du sol. Cette théorie, peut se soutenir pour les eaux minérales ou pour les fissures profondes comme M. Gautier, essaie de le démontrer par des expériences ingénieuses. Elle ne peut être invoquée ici, pour cette raison qu'à travers les argiles la circulation de l'air est très difficile. Quand on veut faire des prises d'air dans de tels terrains, on fait le vide presque parfait dans l'appareil de prise, que l'air n'arrive à combler qu'avec une très faible lenteur, et cependant par ce manuel opératoire on exagère singulièrement l'arrivée rapide du gaz. Ainsi on comprend qu'à l'état naturel l'apport par l'infiltration de gaz humide à travers la couche argileuse, s'il existe, doit être faible. Il reste donc, pour alimenter les drains de la propriété de Risler, les eaux provenant de l'atmosphère.

Risler s'est astreint pendant trois ans à mesurer la quantité d'eau drainée et celle tombée sur le sol. En faisant la moyenne de ses expériences il trouva qu'il récoltait dans ses drains 20 p. 100 environ des eaux tombées et mesurées par un pluviomètre. Les quatre cinquièmes avaient été évaporés. Comme il tombait annuellement 80 centimètres d'eau, 64 centimètres étaient évaporés.

Si on admet avec Wollny, Lawes, que la production de 1 gramme de matière végétale sèche exige en moyenne 300 grammes d'eau, on estime que pour arriver à maturité il faut, dans nos pays :

	Tonnes métriques d'eau.
1 hectare de blé	1.180
1 — de seigle	835
1 — d'orge	1.237
1 — de forêt	1.950
Moyenne	1.300

Soit une hauteur annuelle de $0^m,13$ d'eau.

Worré admet qu'un hectare de blé nécessite une hauteur annuelle de 240 millimètres d'eau, un hectare de bois de hêtre de 100 à 350 millimètres d'eau à laquelle il faut ajouter l'eau de constitution des plantes.

Il reste donc de 40 à 50 centimètres d'eau évaporée par le sol dans l'expérience de M. Risler; cette quantité d'eau est très vraisemblable. On sait fort bien qu'en été les drains ne donnent presque pas d'eau, le gain a surtout lieu l'hiver où l'évaporation est de beaucoup moins active et où il pleut généralement davantage.

Ce coefficient de un cinquième des eaux tombées représentant le profit de la nappe souterraine pendant une année n'était pas toujours exact. Il variait suivant les années et avec les cultures; c'est une moyenne très approximative.

M. Imbeaux a, d'autre part, totalisé ainsi qu'il suit l'action d'une forêt sur la quantité d'eau tombée annuellement.

	De la pluie tombée.
a) Action d'arrêt du dôme de feuillages.	0,30
b) Évaporation du sol boisé............	0,13
c) Transpiration des arbres............	0,29
Total......................	0,72

Soit les trois quarts de la pluie tombée.

Déjà avant Risler, l'abbé Paramelle admettait que les pluies donnaient environ, en sécheresse ordinaire, un débit de 4 litres par minute pour 5 hectares de bassin versant, soit environ le quart de leur quantité. M. Imbeaux a contrôlé ce coefficient en Meurthe-et-Moselle et l'a trouvé très sensiblement exact pour les terrains perméables. Beaucoup d'auteurs (Duclaux), qui se sont occupés de cette question ont trouvé un chiffre sensiblement voisin de un cinquième en comparant la quantité d'eau tombée sur le bassin de Paris et les débits des eaux fluviales s'en allant à la mer. Cette dernière méthode, que nous ne

faisons que signaler, a le défaut de faire entrer en ligne de compte les eaux de ruissellement qui n'ont pas profité à la nappe. Elle ne tient pas non plus compte des eaux souterraines qui s'écoulent à la mer sans être revenues au jour.

M. Schardt, dans une intéressante étude sur les eaux de la Doux (1), source de l'Areuse, a montré au moyen du débit de cette source, connaissant la surface de son périmètre d'alimentation, que la quantité d'eau de pluie profitant à la nappe souterraine est de 60 à 70 p. 100 dans ces terrains du jurassique supérieur, formations excessivement perméables trouées d'amposieux reposant sur une couche argileuse de l'Argovien ayant 200 mètres d'épaisseur.

Comme conclusions de ce que nous venons de voir dans les terrains sableux ou finement fissurés, les eaux des nappes souterraines peuvent être évaluées au cinquième des eaux de pluies tombées sur la surface du sol. Toutefois, quand le ruissellement sera abondant il deviendra utile d'en déterminer l'importance de façon à diminuer approximativement d'autant ce coefficient du cinquième. Dans les terrains très fissurés ce coefficient doit être plus élevé. Nous verrons par la suite, en raison de l'importance du problème, la façon d'augmenter ce coefficient d'absorption des eaux de pluie. On voit dès maintenant qu'il suffirait de diminuer au moins l'évaporation des eaux tombées.

Malgré l'incertitude du coefficient d'absorption des eaux de pluie dans le sol, si on l'admet voisin de un quart à un cinquième, on peut quelquefois connaître par ce moyen l'origine des eaux souterraines qu'on trouve.

Ainsi, lors de la construction du tunnel du Simplon, on a trouvé entre les kilomètres 3 830 et 4 420 des sources de débit de 1000 litres dont le périmètre d'alimentation

(1) M. Schardt, *Bulletin Société belge de géologie*, 1905, p. 559 à 569. M.



n'aurait occupé qu'une surface d'environ 10 à 11 kilomètres carrés. Les pluies tombées sont dans l'impossibilité de fournir cette quantité d'eau, et c'est ainsi qu'on a été amené à rechercher l'influence du torrent de la Cairasca qui, par infiltration, contribue à l'alimentation de ces eaux souterraines.

De l'alimentation des nappes souterraines par les eaux de condensation de l'air atmosphérique. — Certains hydrologues allemands ou belges, comme MM. le docteur Vogler, Buker et Schulze, King, Worré, d'Andrimont considèrent que la quantité d'eau évaporée par le sol et la végétation dépasse de beaucoup celle fournie par les pluies. Il faut donc que cette même quantité évaporée soit prise à une source déterminée, et en dehors de la pluie. Comme l'eau ne peut venir de la profondeur du sol, ainsi que nous l'avons vu au paragraphe précédent, il faut qu'elle provienne de la condensation de l'atmosphère extérieure, toujours humide. Ils considèrent donc que le surplus qui profite aux nappes souterraines est apporté par les brouillards et l'humidité de l'air. Dalton prétend qu'en Angleterre les brouillards peuvent fournir à eux seuls 742 millimètres d'eau par an ; quant à la rosée, elle est évaluée par Derres, en Angleterre, à 38 millimètres, et par Wollny, à Munich, à 3,5 p. 100 de la pluie annuelle.

Les corps solides jouissent en effet de la propriété d'attirer à leur surface l'humidité, par conséquent de condenser la vapeur d'eau de l'atmosphère. Schubler a constaté que 1000 grammes de terre étalés sur une surface de 50 pouces carrés absorbent en vingt-quatre heures, savoir :

Sable quartzeux..............	traces.	
Gypse........................	1	gramme.
Terre arable.................	23	—
Argile.......................	28	—
Terre calcaire...............	35	—
— de jardin..............	52	—
Fumures......................	120	—

D'autre part, une expérience de Lord Kelvin démontre la condensation de l'humidité par les surfaces solides.

Dans une cloche reposant sur un cristallisoir rempli d'eau, on suspend un tube capillaire, ouvert à ses deux extrémités. Le dispositif entier est placé dans un endroit où la température est constante.

On constate au bout de quelques jours que l'eau monte dans le tube capillaire jusqu'à une certaine hauteur. Le résultat aurait été identique si on avait plongé ce tube directement dans l'eau du cristallisoir. Il y a donc eu condensation de la vapeur d'eau.

Les travaux de Lyman J. Briggs (1) confirment la propriété qu'a toute substance solide ainsi que le quartz, de condenser l'eau atmosphérique, attraction qui est d'accord avec le théorème de Gibbs relatif à l'absorption des substances dissoutes.

M. Worré (2) a essayé d'élucider ce problème et prétend que les eaux météoriques ou d'infiltration pluviale n'alimentent guère que les eaux souterraines des terrains fissurés. Pour les terrains sablonneux, l'alimentation en eau serait assurée par la condensation de l'eau à l'état de vapeur dans l'atmosphère.

Les expériences de cet ingénieur furent faites près de la ville de Luxembourg, sur des terrains assez variés.

Un champ avec terrain végétal.
— — argileux.
Un pré plat — végétal.
— — argilo-sableux.
— en taillis avec terrain végétal.
Une forêt à surface couverte.
Un sol pavé.
Un sol empierré.

Après un mois d'observations pluviométriques et météorologiques diverses, M. Worré fit des sondages dans les

(1) Lyman I. Briggs, *Chemistry*, t, IX, nº 8, p. 617-640, 11, 1905.
(2) Worré, *Publications de l'Institut Grand-Ducal de Luxembourg*, t. XXIV, 1896.

différents terrains et trouva qu'au delà de 1m,79 de profondeur l'eau ne pénétrait plus.

Les terrains classés ainsi d'après Worré semblent être constitués par la couche la plus superficielle et, de ce fait, la plus argileuse ; ce ne sont pas des terrains types formés de couches géologiques comme le sable ou le calcaire.

Pour qu'il y ait apport de vapeur de l'atmosphère dans le sol, il faut qu'il y ait circulation d'air à travers ses pores.

D'après M. Worré, cette circulation existe et serait très active ; voici l'explication qu'il en donne :

« On sait que l'air atmosphérique est composé, en volume, de 20,8 d'oxygène et 79,2 d'azote avec 3 à 6 dix-millièmes d'acide carbonique et 6 à 9 millièmes de vapeur d'eau. Or l'oxygène qui s'accumule dans la terre poreuse, s'attaque aux substances organiques et les minéralise.

« L'acide carbonique aide l'eau à dissoudre les carbonates de calcium, de magnésium et de fer ;

« L'azote est assimilé, entre autres, par les légumineuses au moyen des nodosités à bactéries que portent leurs racines ;

« La vapeur d'eau disparaît en partie par condensation ;

« La tension se trouve abaissée par le refroidissement ;

« Il en résulte que l'air, après quelque séjour dans l'intérieur de la terre, se trouvant gravement altéré, sous tous les rapports, dans sa constitution initiale, tend à se mêler, par voie de diffusion, avec l'air atmosphérique, pour reformer un tout homogène ; et comme l'atmosphère est presque infinie par rapport au volume de l'air altéré du sol, cet air doit se dégager en totalité, pour que l'équilibre devienne stable.

« Immédiatement après, le même processus se répète ainsi de suite. »

Il est évident, en effet, que la condensation de la vapeur

d'eau dans le sol doit être assez grande si la circulation de l'air atmosphérique est facile.

Or une expérience de MM. Dehérain et Demoussy a montré que si la circulation de l'air est facile à travers les sables secs, elle est extrêmement lente quand les sables deviennent humides.

A la suite de cette expérience il y a lieu d'admettre qu'en hiver, quand la surface du sol est très humide, la circulation de l'air ne doit pas être très facile et très probablement l'apport des eaux par les brouillards doit se faire principalement à la surface du sol et non en profondeur.

En été, époque où l'évaporation tant par le sol que par les plantes est très active, la circulation de l'air est plus facile. C'est aussi le moment où l'atmosphère très humide et chaude vient se condenser dans le sol froid.

D'autre part, les phénomènes d'altération du sol ne sont importants qu'à la surface et non en profondeur, ils ne peuvent provenir que de l'infiltration des eaux pluviales. Nous admettons donc très facilement la condensation de l'humidité de l'atmosphère dans la couche supérieure du sol, condensation se produisant principalement la nuit, et l'été époque où le sol se refroidit plus vite que l'air. Imbeaux admet cependant l'influence de ces condensations sur les sources en montagne. Cette eau condensée alimente en grande partie l'évaporation de la journée, mais elle est encore insuffisante par elle-même, car pendant les années sèches la végétation est languissante par suite de l'absence des pluies. Au contraire, en hiver les eaux pluviales interviennent pour une très grande part dans l'alimentation des nappes, et c'est ici que l'expérience de De Heen et les travaux de d'Andrimont revêtent une certaine importance. Nous avons vu précédemment qu'il y avait lieu de considérer deux chemins de descente de l'eau à travers les sables: La descente superficielle ou pelliculaire et la descente capillaire.

A la surface du sol l'eau comblera facilement les espaces lacunaires et la descente commencera d'une part en raison de la vitesse pelliculaire et d'autre part en raison de la vitesse capillaire. Si la vitesse et le débit de la colonne par les espaces capillaires sont supérieure au débit et à la vitesse pelliculaires, c'est par les espaces lacunaires que l'infiltration de l'eau se fera jusqu'au moment où la constitution des pellicules d'eau autour de chaque grain traversé aura absorbé toute l'eau.

Si c'est l'inverse, c'est-à-dire si le débit et la vitesse pelliculaires sont supérieurs à la vitesse et au débit des espaces lacunaires, toute l'eau sera entraînée par la couche pelliculaire dans l'intérieur du sol.

Voici une expérience de M. de Heen telle qu'elle est rapportée par M. D'Andrimont (1) et répondant à ces conditions.

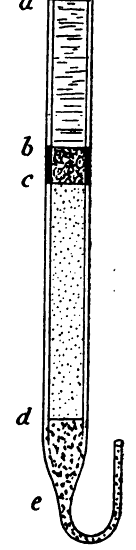


Fig. 19. — Tube de Heen.

« Dans la partie inférieure d'un tube de verre, on introduit d'abord une couche de sable destinée à représenter la couche aquifère. Le tube n'est pas fermé à sa partie inférieure, mais effilé en pointe, afin de permettre le départ de l'air. Au-dessus du sable, en *bd*, on introduit une couche de limon pulvérisé en poudre impalpable. Si l'on vient à introduire de l'eau en *ab*, on remarque d'abord que la partie supérieure du limon s'imprègne complètement d'eau. Dans ces conditions, par suite d'un effet de réfraction, le contact de l'eau et du verre fait que le cylindre de limon apparaît comme ayant un diamètre égal au diamètre extérieur du tube (fig. 19). Mais lorsque l'imprégnation s'est faite sur une hauteur *bc* le débit

(1) D'Andrimont, *Congrès international des Mines et de la Métallurgie* (*Géologie appliquée*), p. 152, 1905.

diminue déjà suffisamment pour qu'il ne puisse plus alimenter à la fois les *pores* et les *micropores*. Et comme ces derniers, par suite de leur petit diamètre, ont une puissance de succion incomparablement plus grande que les premiers, ce sont également eux qui servent exclusivement de véhicule à l'eau à partir de ce moment. Le tube n'est plus mouillé, et le cylindre de limon apparaît comme ayant un diamètre égal au diamètre intérieur du tube en verre, et l'on voit à la loupe les grains d'argile sans interposition d'eau. Les choses se passent ainsi jusqu'au moment où l'eau, traversant les *micropores* (1), atteint la surface du sable en *d*. L'eau sort alors de ces espaces ultra-capillaires et pénètre dans les pores du sable ; elle imbibe complètement celui-ci, et le cylindre de sable apparaît de nouveau comme ayant un diamètre égal au diamètre extérieur du tube, de même qu'en *bc*. Le liquide, en un mot, redevient complètement libre, et, en résumé, le liquide a traversé la couche de limon *à l'état superficiel.* »

L'eau peut donc passer en profondeur à travers une couche de particules fines sans être visible. Il est évident que les mêmes phénomènes se produisent dans la nature et il est impossible de tabler sur les résultats de M. Worré pour affirmer que l'eau de pluie ne peut fournir une quantité d'eau suffisante pour l'alimentation des eaux souterraines.

La théorie du Dr Vögler, le chef de cette école, a été réfutée en partie par M. J. Hann, de Vienne.

Cette conclusion est réfutée, au moins en partie, par

(1) De Heen admet que dans un sable humide, chaque grain est doué de *micropores* d'une telle ténuité que leur section est de l'ordre de grandeur de la sphère d'activité moléculaire de l'eau. Ces micropores sont comme des sillons très fins à la surface des grains de sable. On pourrait objecter, dans cette expérience, qu'à travers le limon la circulation est difficile tandis que le long des parois du tube elle est plus facile. S'il en était ainsi, l'effet de réfraction constaté en *bc* se produirait encore en *cd*, contrairement au résultat de l'expérience.

M. Rutot (1), qui signale que dans tous ses sondages, faits au-dessous de la zone d'évaporation, tous les sables trouvés sont humides. D'autre part, s'appuyant sur la décalcification superficielle sur une épaisseur de 5 à 6 mètres des limons éoliens des environs de Bruxelles, ce géologue pense qu'un tel phénomène ne peut exister que s'il y a eu infiltration pluviale.

D'autre part, M. Van den Broeck fait remarquer à ce sujet que la relation qui existe entre la richesse des eaux des sables calcarifères de Bruxelles et le degré hydrotimétrique des eaux souterraines ne peut s'expliquer que par le ruissellement continu d'eau à travers ces sables.

Dausse, dans le bassin de Paris, a observé que les pluies qui profitent aux nappes sont celles tombées en hiver. En été l'évaporation est trop grande et on ne constate, même après les grandes pluies, qu'une augmentation insignifiante des débits. Or, d'après ce que nous savons de la circulation de l'air, pour l'alimentation souterraine, le profit de cette nappe devrait être maximum en été et non en hiver; c'est-à-dire le contraire de ce que l'observation démontre. D'autres faits comme l'augmentation brusque des débits des sources après les pluies, leur décroissance quand ces pluies viennent à cesser, démontrent que dans les terrains diaclasiques ou fissurés la pluie profite aux nappes souterraines, l'hiver et non l'été. Or, à travers les diaclases, la circulation de l'air est bien plus facile qu'à travers les pores des sables, et la condensation de l'humidité devrait y être maxima.

La théorie du Dr Vöglersemble ne pas être l'expression exacte de la vérité et paraît trop exclusive. C'est pourquoi M. Worré la limite simplement aux terrains sableux.

Comme autre preuve, l'école allemande, signalait la très petite quantité d'eau qui s'infiltre à travers le plafond des grottes. Ainsi à celle de Han, par exemple, on peut

(1) Rutot, *Société belge de géologie*, p. 93, 1896.

y séjourner plusieurs heures sans y être incommodé par les gouttes d'eau qui tombent.

Le dégouttement est plus grand en été qu'en hiver parce que l'eau met plusieurs mois pour parvenir dans la grotte.

Mais en 1889, on a constaté après des pluies abondantes des infiltrations beaucoup plus tôt que d'habitude. D'après M. E. Dupont (1), l'infiltration des pluies en temps ordinaire, était ralentie par les bois se trouvant au-dessus de la grotte. En 1889 on déboisa et leur influence ne se fit plus sentir.

Voyons d'autre part ce qui se passe dans une grotte, ou bien dans les carrières de grès de Fontainebleau, observées près de Nemours, à Darvault. Par mètre carré, dans la saison des pluies il tombe 8 à 10 gouttes d'eau assez grosses par minute. Un calcul très simple, répartissant cette eau sur 120 jours, montrerait que l'infiltration est suffisante pour fournir à la nappe souterraine 200 millimètres d'eau par an.

De l'ensemble de tous ces faits nous considérons que la pluie est le principal pourvoyeur en eau de la nappe souterraine. La condensation de l'humidité de l'air entretient l'humidité à la surface du sol en été, fournit aux plantes la quantité d'eau nécessaire à leur évaporation. Cet apport jusqu'à la nappe paraît être plutôt faible, et au lieu d'admettre avec l'école allemande que ce sont des eaux de condensation qui alimentent le sous-sol et la pluie l'évaporation, nous tendons à la conclusion inverse. Il serait intéressant de connaître pourtant la part même faible que ces eaux prennent à l'alimentation des nappes; malheureusement des expériences systématiques n'ont guère été tentées jusqu'ici sur ce sujet. En résumé, en hydrologie, ce sont surtout les pluies que nous envisagerons et, comme base aux études ultérieures, le profit

(1) E. Dupont, *Bulletin Société belge de géologie*, 1894, p. 274. Mémoire.

que les nappes en retirent sera estimé au 1/4 ou 1/5 dans les terrains perméables sans ruissellement. Ce coefficient devra être diminué dans les terrains moins perméables d'une quantité au moins égale au ruissellement constaté, et dans les terrains excessivement perméables il sera augmenté jusqu'à la valeur 1/2.

Eau d'origine géologique. — En recherchant des eaux souterraines il arrive quelquefois d'en rencontrer dont la composition ne reflète nullement celle des terrains qui les renferment. L'analyse démontre qu'elles sont riches en sel marin, leur composition est identique à celles des eaux de la mer. Elles proviennent d'un emprisonnement d'eau de mer au moment de la formation géologique de ces terrains.

Voici une analyse faite sur des eaux trouvées dans la région du Hainaut.

Analyse d'une eau trouvée au puits n° 18 du charbonnage des Produits (1).

Densité 18°	1,04
Rendu fixe par litre	59gr,800
Carbonate de calcium	0gr,716
— de magnésium	0gr,184
— de fer	0gr,006
Sulfate de calcium	0gr,468
— de magnésium	14gr,352
— de sodium	0gr,052
Chlorure de sodium	38gr,029
— de magnésium	3gr,092
— de calcium	2gr,868
Iodure de sodium	0gr,015
Silice	0gr,018

Conclusions. — Dans ce chapitre nous avons vu la triple origine des eaux souterraines; nous pensons avoir démontré suffisamment que la pluie est le facteur le plus important de l'alimentation des nappes. La conclusion qui s'impose est donc, puisque les moyens de favoriser

(1) Kersten, *Bulletin Société belge géologique*, p. 662, 1902.

sa précipitation sont jusqu'ici bien aléatoires et de résultat médiocre, d'en retenir du moins le maximum d'effet utile, en diminuant les causes de son évaporation et de son ruissellement.

IV

DE LA CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES

Une couche imperméable est celle qui est capable de retenir l'eau à sa surface pendant un temps assez long. Elle est complètement imperméable quand ce temps devient infini. Lorsque dans leur mouvement de descente les eaux infiltrées passent d'un terrain dans un autre de beaucoup plus faible conductibilité, une partie plus ou moins grande de celles-ci se trouve arrêtée et se met à ruisseler souterrainement à la surface du terrain de plus faible conductibilité.

a) **Couches imperméables.** — Celui-ci peut être formé, soit par une couche calcaire peu fissurée, succédant brusquement à une autre plus fissurée, soitpar une couche argileuse ou schisteuse. La spéléologie a montré, dans le cours des explorations des cavernes, que les eaux souterraines formaient souvent des ruisseaux dont le lit était calcaire. Il suffit que la couche calcaire rencontrée à une certaine profondeur soit peu fissurée pour ne laisser s'infiltrer qu'un débit d'eau peu appréciable; mais si, après avoir ruisselé quelque temps, l'eau rencontre une fissure plus grosse, cela lui permet de descendre dans le sol à une profondeur plus grande jusqu'au moment où se présentera une autre couche calcaire peu perméable incapable d'absorber tout le débit des eaux souterraines. A nouveau un ruissellement se produira encore et ainsi de suite. Cette généralisation de la notion du terrain imperméable permet d'envisager, sans idée fausse, tous les cas de la circulation souterraine.

A la surface du sol on distingue bien trois sortes d'eau, les eaux évaporées, les eaux de ruissellement et celles qui s'infiltrent, la proportion de chacune d'elles étant réglée par les vitesses d'absorption du sol lui-même, mais on refusait cette distinction dans le sol aux eaux qui s'y infiltraient. Or ce ruissellement dans les profondeurs, qui constitue la circulation souterraine, ne se différencie du ruissellement superficiel que parce que le premier se produit à travers un terrain perméable, tandis que l'autre se fait à l'air libre, c'est-à-dire que pratiquement il n'y a aucune distinction.

Comme exemple de terrain très imperméable, on doit citer l'argile.

On admettait pendant longtemps que l'argile était un terrain complètement imperméable. Les analyses ont montré que l'argile n'est pas toujours très pure et nous avons vu dans les expériences de M. Pichard qu'elle devient d'autant moins perméable, qu'elle est plus pauvre en silice. Son imperméabilité augmente encore par la compression.

Spring (1) d'une part, Rabozée (2) et Casse (3) ont montré en effet qu'en absorbant de l'eau, l'argile se gonfle et peut laisser passer l'eau ; mais quand on empêche cette dilatation, ce qui existe quand la couche argileuse est comprimée entre deux terrains résistants, ou que son épaisseur dépasse 7 à 10 mètres, l'eau ne peut pénétrer dans la masse interne et le terrain est alors complètement imperméable.

Cette conclusion est importante parce qu'elle montre que sur le bord des affleurements, où l'argile n'a pas une épaisseur suffisante, l'imperméabilité n'est pas absolue.

De même dans les couches où l'argile n'a pas partout

(1) Spring, *Annales de la Société géologique de Belgique*, t. XXVIII, M, p. 117, 1901.

(2) Rabozée, *Société belge de géologie*, p. 291, 3 juin 1902.

(3) Casse, *Société belge de géologie*, 13 mai 1902.

une épaisseur suffisante il peut se trouver des endroits où les eaux peuvent descendre dans un gisement géologique inférieur (1). Ceci concorde avec l'hypothèse de M. Pouchet qui ne peut expliquer l'importance de certaines nappes d'eau inférieures que par l'infiltration des nappes supérieures à travers l'argile. Il est juste d'ajouter qu'on trouve également des terrains très secs au-dessous des couches d'argile importantes. Sous la colline de Laon (fig. 20) l'argile a une assez grande épaisseur pour être

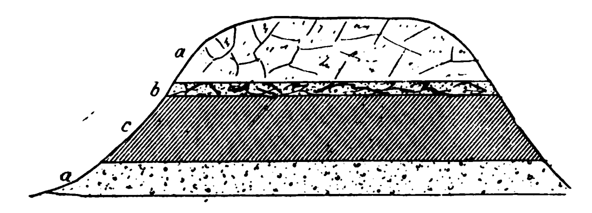


Fig. 20. — Coupe de la colline de Laon.

a, calcaire grossier ; *b*, calcaire grossier sableux ; *c*, argile ; *d*, sables du Soissonnais.

imperméable. Au contraire, sous la colline de Cassel l'argile glauconifère n'empêche pas des infiltrations d'eau des sables de Diest dans les sables du Parisien. Une autre conséquence des recherches précédentes c'est qu'une pâte d'argile perd son eau, même au sein de l'eau, quand on la comprime dans une enveloppe perméable d'où elle ne peut s'échapper parce que l'imperméabilité de l'argile provient justement de sa combinaison avec l'eau.

Quel que soit le terrain, on trouvera toujours de l'eau quand un terrain très perméable reposera sur un terrain qui l'est moins. Si un même gisement géologique comme la craie, est formé de couches alternativement très perméables et peu perméables, on aura, en faisant un forage vertical et au fur et à mesure qu'on descendra, une

(1) Martel, *C. R. Académie des Sciences*, 1er octobre, 1906.

première nappe, une deuxième nappe, etc. A la campagne cette question de première et de deuxième nappe est très fréquente et on sait fort bien que les eaux de la deuxième nappe sont bien meilleures et moins contaminées que celles de la première nappe.

Dans la craie (dans l'Hervien), dans le nord de la France ou en Belgique, on trouve des parties formées de silex agglomérés qu'on désigne sous le nom de *tun* ou de *tawes* ou *meule*. Ces roches donnent naissance à une

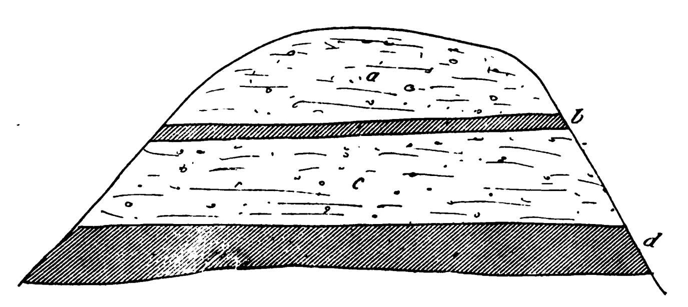


Fig. 21. — Coupe de la colline de Cassel.

a, sable de Diest ; *b*, argile glauconifère de l'étage Asschien ; *c*, sables du Parisien ; *d*, argiles de l'Yprésien.

nappe. En Angleterre, dans le bassin de Londres et de Southampton les sables éocènes de Thanet renferment de l'eau reposant sur un conglomérat de silex agglutiné par un enduit.

Souvent encore, dans un terrain, on trouve des couches argileuses discontinues formant des lentilles au milieu du terrain perméable. Dans la forêt de Soignes, par exemple, ou même dans les sables moyens de Bohême (de Launay), etc. on trouve de ces lentilles argileuses au milieu des sables Bruxelliens. La surface des nappes d'eau a sensiblement la forme représentée dans la figure 22.

Les deux puits creusés en B et en C rencontrent alors

l'eau à des profondeurs variables quoique très voisines. Dans le Bajocien par exemple, on trouve des niveaux d'eau de faible importance formés par l'intercalation de lits marneux au milieu des calcaires.

Les terrains rocheux massifs ou les roches compactes et continues comme le granit, les gneiss, les porphyres, les schistes et certains calcaires sont imperméables; s'ils renferment un peu d'eau, c'est, comme nous l'avons déjà dit, dans les déclivités remplies de détritus ou de parties

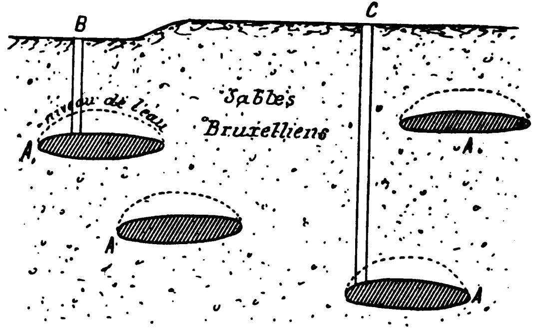


Fig. 22. — Coupe verticale dans la forêt de Soignes (Belgique).

de roches décomposées par les agents atmosphériques (arènes granitiques, alluvions).

Parmi les couches imperméables il faut encore, d'après Keilhack, de Berlin (1), ranger les formations de moraines profondes appartenant au type des argiles à blocs erratiques ainsi que toutes les formations d'apparence argileuse constituées par du sable d'une très grande ténuité. La limite de perméabilité de ces sables correspond à un diamètre des grains de $0^{mm},02$ et par conséquent les diverses formations sableuses rangées sous les dénominations de sables marneux et de sables très fins doivent être comprises dans le groupe des roches difficilement perméables.

(1) Keilhack, *Congrès inernational des mines de Liège*, 1905, p. 1.6.

Terrains perméables. — MM. Debauve et Imbeaux divisent les terrains perméables en trois classes :

1) Les terrains poreux ou finement perméables comme les sables, les graviers, les limons, la tourbe, les grès, et les alluvions glaciaires, les dunes. Ces terrains sont formés de particules assez fines pour ne laisser entre elles que des espaces ou canalicules étroits. On dit alors que ces terrains sont *perméables en petit* parce que les phénomènes capillaires y sont très importants.

2) *Les terrains rocheux fragmentés* : comme les blocs de laves volcaniques et en général tous les éboulis rocheux, formés par la désagrégation de terrains en place. On les trouve principalement sur les pentes ou au fond des vallées. Ces terrains laissant entre eux des fissures de dimensions notables *sont dits perméables en grand* comme ceux de la troisième classe. La descente des eaux a surtout lieu en vertu de la pesanteur, comme nous l'avons déjà vu.

3) Les terrains rocheux fissurés comme les terrains calcaires, certains granits et certains grès. La perméabilité de ces terrains est due à la présence des fissures désignées sous le nom de diaclases.

Nous commencerons par étudier la circulation des eaux dans les terrains *perméables en petit.*

Circulation des eaux dans les terrains perméables en petit. — Lorsque l'eau imbibe le sable, nous avons vu les conditions à remplir pour qu'elle s'infiltre dans le sol. Ce mouvement de descente, qui ne se produit bien que dans les sables de diamètre supérieur à $0^{mm},02$, se continue jusqu'à la rencontre d'une couche moins perméable. L'eau s'accumule alors et occupe les pores. Il arrive un moment où l'eau, continuant à emplir les vides, écarte les grains de sable les uns des autres et ne leur permet plus de se toucher. Spring a remarqué que dans ce cas tout se passe comme si le sable était dans l'eau et non l'eau dans le sable. Les grains de ce dernier manquent de

cohésion et deviennent presque aussi mobiles que l'eau. Qu'on vienne à faire un trou dans leur intérieur, ils rempliront celui-ci aussi rapidement que l'eau dans laquelle ils baignent. C'est ce qui arrive pour les sables dits *boulants* dans lesquels les travaux sont très difficiles. Supposons que par un mécanisme quelconque on puisse retenir les grains de sable, seuls, ceux-ci laisseront écouler toute l'eau qui dépasse leur capacité.

A la surface de ces sables boulants, l'eau monte à travers les pores en raison de la capillarité, les espaces lacunaires constituant une série de canaux plus ou moins capillaires. En vertu des lois de Joulin sur la capillarité, l'eau montera d'autant plus haut que les canaux auront une section plus faible, de telle sorte qu'en faisant une tranche verticale dans le sol, on trouve à la surface une couche d'humidité variable avec l'évaporation, une autre inférieure d'humidité à peu près uniforme, puis une zone dans laquelle l'humidité croît de haut vers le bas, c'est la zone de la capillarité, enfin une zone d'humidité plus forte encore et maxima qui est celle des sables plus ou moins boulants.

Considérons un état d'équilibre de l'eau dans les sables, état qui correspond au maximum d'humidité que ceux-ci peuvent contenir. On sait que toute goutte d'eau arrivant à la partie supérieure de la colonne liquide contenue dans un tube capillaire libère de cette colonne, à sa partie inférieure, une goutte d'eau de même volume. Par assimilation, il en est de même pour les sables dont les pores constituent une série de canaux capillaires. Qu'une certaine quantité d'eau arrive à la partie supérieure, il y a rupture de l'équilibre et de l'eau est libérée à la partie inférieure. D'après les expériences de Schlœsing, cette eau libérée est celle qui se trouvait très proche du lieu où a eu lieu la libération et il n'y a eu qu'un simple déplacement. Dans un sable homogène le déplacement doit se faire sur toute la surface de base reposant sur la couche

imperméable. La mise en liberté, à la surface du sol, ne peut évidemment avoir lieu que dans les parties où la couche de sable repose en affleurement sur la couche imperméable. Dans la figure 23, c'est en A et B que pourra avoir lieu la mise en liberté de l'eau, c'est-à-dire c'est là où il y aura des lieux de sources.

L'uniformité supposée des sables n'admet aucun point où les sources soient plus abondantes que dans d'autres; mais comme ce dispositif est loin d'être la règle, on constate généralement que les sources sont cantonnées

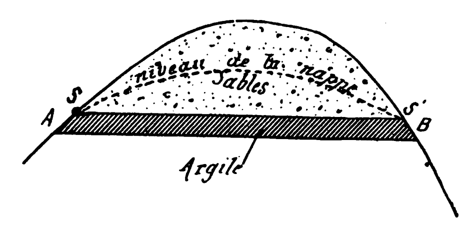


Fig. 23. — Nappe dans un terrain perméable en petit.

en différents points assez bien définis, comme nous le verrons plus loin.

C'est qu'en effet l'uniformité des sables n'est qu'une vue théorique. Il existe des parties plus ou moins riches en argile et dans lesquelles la perméabilité est moindre, dans certaines autres parties un ciment agglutine les grains de sable. Ainsi, nous avons eu l'occasion de constater dans un petit affleurement des sables tertiaires inférieurs (sables de Cuise) qui reposaient sous le village d'Irreville dans l'Eure, le cas de zones où la circulation dans les sables était lente, et une zone nettement délimitée où la circulation était beaucoup plus rapide.

L'uniformité est encore plus difficile à trouver dans les sables plus grossiers que les sables de Cuise ou les sables de Fontainebleau, comme par exemple les graviers et les alluvions. Même dans les sables algériens,

Edouard Blanc signale également des poches argileuses ou rocheuses donnant naissance à de petites nappes désignées sous le nom de *oglat*.

Daubrée cite dans son ouvrage bien connu d'hydrologie, le cas des alluvions du Rhin. Il a pu mettre en évidence, du côté du Faubourg de Pierre à Strasbourg, un courant souterrain, grâce à une contamination de puits au moyen de goudrons d'usine à gaz. Cette dernière, en effet, pour éliminer ses goudrons les envoyait dans un puits perdu. Au bout de quelque temps on constata que certains puits de la vallée étaient contaminés et sentaient le goudron, tandis que d'autres n'avaient absolument rien.

A Haguenau, toujours dans les alluvions, l'existence d'un courant souterrain dans une direction déterminée a été révélée par une infiltration d'eau chaude à partir d'un puits où se déversait l'eau d'échappement d'une machine à vapeur. Les puits, dont les eaux se réchauffaient par l'arrivée de cette eau chaude, étaient strictement limités à une ligne oblique dirigée est-sud-est.

Dans certaines alluvions de la vallée de l'Iton, à Évreux, nous avons également découvert des courants nettement délimités au moyen de la fluorescéine. Les dépôts glaciaires de l'Allemagne du Nord sont également très hétérogènes.

La localisation des courants en terrains sableux peut également tenir à l'ondulation de la couche imperméable.

Ainsi, en Bavière, le Dr Gümbel a trouvé que les sources se trouvaient à l'affleurement des parties les plus basses des ondulations des parties imperméables, la forme de celles-ci étant représentée par la figure 24. Les vallées souterraines A et B sont les lignes d'écoulement des eaux souterraines à l'extrémité desquelles se trouvent les sources. Cette disposition porte le nom de *flinz* en Bavière.

Dans les terrains tertiaires la circulation des eaux

dans les sables devient de plus en plus facile à mesure que les grains deviennent plus gros. Par ordre de grosseur, en commençant par les plus fins, on classe les sables ainsi :

Sables de Fontainebleau.
— Landeniens.
— Yprésiens.
— Rupeliens.
— Bruxelliens.

Nous avons déjà dit qu'au fur et à mesure que l'eau des pluies alimente les sables, il s'en écoule une certaine

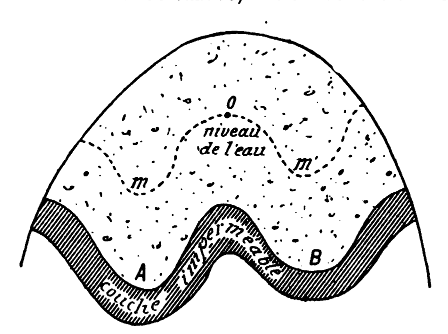


Fig. 24. — Influence de la couche imperméable sur le niveau de la nappe d'eau dans les terrains perméables en petit.

quantité aux points de contact A et B (fig. 23) de la couche perméable et imperméable. Cependant il est évident que la surface d'absorption de l'eau, qui dans notre figure est très sensiblement celle d'une calotte, est beaucoup plus grande que la surface d'écoulement des eaux. D'où il résulte que les sources donneront encore de l'eau bien longtemps après que les pluies seront terminées. La nappe souterraine forme donc un régulateur de l'approvisionnement en eau par les eaux pluviales intermittentes.

Il est utile de montrer la forme de la surface de la nappe d'eau souterraine des sables homogènes d'abord.

Supposons un vase *A B*, rempli d'eau, s'écoulant par un tuyau dont l'orifice soit en F. Sur ce tuyau on place perpendiculairement des tubes verticaux C, D, E (fig. 25). Par suite de l'écoulement, le niveau dans chacun de ces tubes sera d'autant plus bas qu'on se rapprochera de l'orifice d'écoulement F. Les niveaux ainsi établis sont désignés sous le nom de niveaux piézométriques. L'écoulement se fait toujours du niveau le plus haut vers le niveau le plus bas. La différence de niveau est appelée

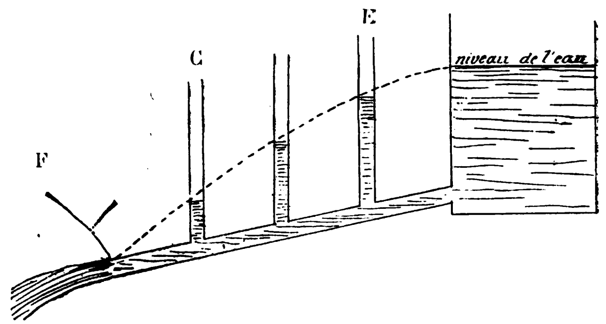


Fig. 25. — Écoulement de l'eau à travers un tuyau.

perte de charge, laquelle représente le travail de l'eau en mouvement.

Dans les sables homogènes la forme de la nappe est une demi-ellipse représentée dans la figure 26. Le point culminant placé à l'endroit où la tangente à l'ellipse est parallèle à l'horizon représente le faîte de la nappe parce que toute molécule d'eau tombant en ce point doit se diriger soit vers A, soit vers B, c'est-à-dire est plus élevée que les molécules voisines.

Le faîte d'une nappe en terrains perméables en petit ne subit, soit après les pluies, soit après les sécheresses, qu'un déplacement vertical et non un déplacement latéral.

Les filets liquides, partant de cette ligne de faîte, se dirigent vers les thalwegs des vallées en s'augmentant progressivement des apports des terrains traversés. Ils abordent le thalweg normalement à sa direction. Leur débit est proportionnel à la différence des niveaux qui existent entre le faîte général de la nappe et le niveau de chaque thalweg, il est en raison inverse du carré de la longueur de son versant.

Ce débit est généralement faible dans ces terrains car

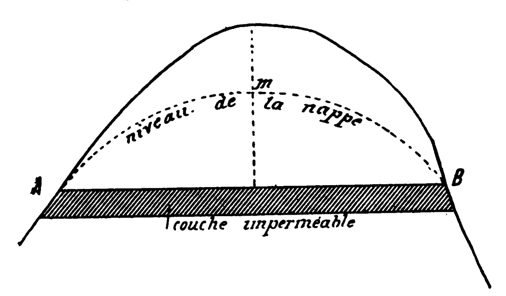


Fig. 26. — Nappe.

le sable exerce sur la vitesse des eaux un obstacle très grand.

On appelle nappe, d'après M. Boursault (1), l'ensemble de la masse d'eau comprise entre le terrain imperméable sous-jacent et les niveaux piézométriques passant par les points supérieurs atteints par l'eau dans toutes les cavités, le niveau supérieur étant appelé *surface hydrostatique de la nappe.*

Cette définition ne s'applique pas sans réserve aux terrains perméables en grand, comme nous le verrons.

Si nous envisageons la figure 24 représentant *le flinz* du Dr Grümbel, la nappe aura la forme *m*, *o*, *m'*, le point O

(1) Boursault, Recherche des eaux potables et industrielles. *Encyclopédie des aide-mémoire*, p. 37.

devant être le plus élevé du moment qu'il ne parviendra aux sources qu'en gagnant la position des molécules *m* ou *m'* lesquelles, en vertu de la loi de l'écoulement, doivent être plus basses.

Toutes ces notions nous seront nécessaires pour les recherches des ressources d'eau dans ces terrains.

La figure 26 montre le cas de deux niveaux d'eau absolument indépendants quoique sur un même mamelon. Une molécule d'eau en *n* quoique plus élevée que *m* ne

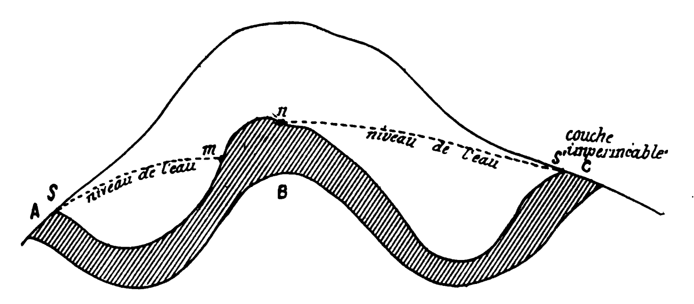


Fig. 27. — Exemple de deux nappes souterraines indépendantes, quoique sous un même mamelon.

pourra s'écouler vers A à cause de la couche imperméable.

La source étant la cause la plus générale, mais non la seule de l'écoulement des eaux dans ces terrains, nous avons, jusqu'ici envisagé le cas de l'émergence formée là où la couche imperméable arrive en affleurement, mais si nous considérons la figure 27 qui représente une partie d'un terrain sableux emprisonnée dans une poche imperméable et une vallée dans la partie médiane. Nous voyons que la source *s* se formera dans la vallée interne et non à l'affleurement d'une couche imperméable.

Pendant longtemps on a considéré que dans un pareil dispositif, on pouvait diviser le sol en trois parties.

Une partie D dont les eaux infiltrées alimentaient la nappe. Cette partie était appelée *zone des eaux en mouvement*.

La deuxième partie, B, B, était le trop-plein du niveau statique inférieur. Enfin la partie A, ou réservoir aquifère, était celle des eaux en repos; ne contribuait à alimenter la source S que la partie B de la nappe et non la partie A.

L'expérience a montré que la circulation dans cette

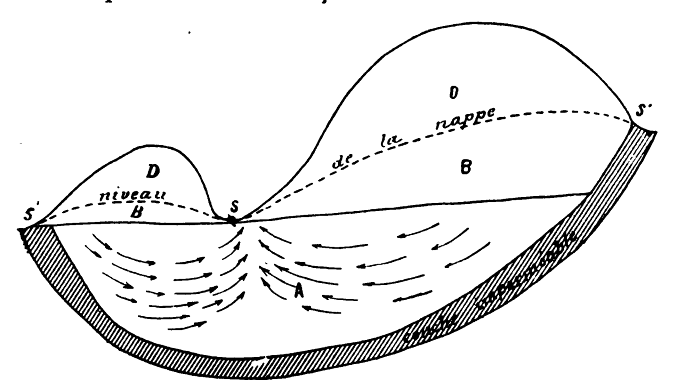


Fig. 28. — Circulation de l'eau dans un terrain perméable en petit limité par une cuvette imperméable.

nappe homogène était plus compliquée et que la partie A comme l'indiquent les flèches de la figure 27 contribuait comme B à l'alimentation de la source.

D'Andrimont, qui a contribué à cette démonstration, a même fait voir pour les Dunes de la Belgique, par un procédé que nous reverrons dans la deuxième partie, que le mouvement de l'eau à la partie supérieure de la nappe pouvait être l'inverse de celui qui se produisait à la partie inférieure.

D'autre part, MM. d'Andrimont et Dubois ont montré, en s'aidant des différences de densité de l'eau potable et de l'eau salée, comment on pouvait expliquer la présence d'eaux douces dans les Dunes.

On peut assimiler la mer à la branche renversée d'un siphon dont l'autre branche serait représentée par la dune. L'eau de pluie, peu riche en sels, a une densité moindre que l'eau de mer; donc l'équilibre, entre ces deux eaux, dans les deux branches du siphon, a lieu quand, la hauteur des colonnes d'eau dans la mer et la dune au-dessus d'un plan horizontal, passant par le plan de séparation entre l'eau douce et l'eau salée, sera en raison inverse des densités, si toutefois la diffusion est lente ou

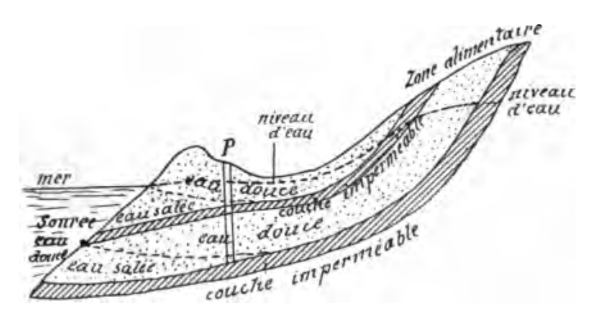


Fig. 29. — Explication d'après d'Andrimont, de la présence d'eau douce dans les sables des dunes.

difficile. L'eau douce la moins dense doit être plus élevée que l'eau de mer, d'où son écoulement vers celle-ci.

La figure 29, qui indique très bien pourquoi on rencontre deux couches d'eau douce et une couche d'eau salée en forant le puits P, schématise cette circulation.

Circulation à travers les sols perméables en grand. — Nous avons vu qu'une roche fissurée peut être considérée comme l'agrégat plus ou moins volumineux d'une quantité de grains de sable, agrégat à peu près imperméable à l'eau. Les joints de stratification et les cassures multiples, résultats du travail de la terre dans le cours des siècles depuis sa formation, constituent des solutions de continuité.

La plupart des roches compactes sont fissurées. Ces fissures portent le nom de *diaclases*, dont les directions sont plus ou moins perpendiculaires ou obliques à la direction des strates. Ces diaclases, de même que les joints de stratification, favorisent l'écoulement des eaux. C'est pourquoi il est utile de déterminer la direction du pendage des couches qui indique également celle des eaux souterraines.

A travers ces fissures, les eaux s'achemineront parce qu'elles y trouveront un chemin de moindre résistance. Quand la roche est calcaire, l'eau la dissout et les diaclases s'agrandissent peu à peu.

L'écoulement dans ces fissures est d'autant plus facile que les parois sont plus écartées, exactement comme s'il s'agissait d'une circulation dans les tuyaux et les canaux.

Le frottement, alors, diminuant tandis que la vitesse augmente, à l'action dissolvante des eaux sur le calcaire, qui est la plus importante, s'ajoute une action mécanique, résultant de la circulation de l'eau dans les fissures.

Le creusement des cavernes ou des canaux souterrains est favorisé par les variations et les excès de pression dus aux crues périodiques, par les éléments sableux entraînés ainsi que par les tremblements de terre.

Tous les terrains calcaires sont formés de couches plus ou moins tendres.

Les diaclases se forment surtout dans les joints de stratification. M. Imbeaux (1) a fait voir que les lignes de cassure jouent un grand rôle dans ces terrains et dirigent les eaux souterraines. Ces lignes sont très souvent parallèles ou perpendiculaires à la direction des failles (qui sont elles-mêmes des lignes de cassures) et à celle des anticlinaux. Comme exemple de drainage par les failles, on peut citer la faille de Clairlieu près Nancy et, dans le tunnel du Simplon, la faille très souvent signa-

(1) Imbeaux, *Eaux de Meurthe-et-Moselle*, p. 46.

lée par Schardt à travers le gneiss et les schistes micacés.

Les excursions spéléologiques démontrent que les cavernes ne sont autres que l'élargissement de fissures déjà existantes.

Dans la grotte de Han, très inclinée à 45°, et creusée dans le Givetien, on distingue les fissures de diaclases et celles provenant de l'élargissement des joints de stratification. Elles se coupent généralement à angle droit.

D'après M. Gosselet (1), dans la craie du nord de la France, les fissures ont à peu près une direction parallèle, fait confirmé par d'Andrimont (2) pour le massif crayeux de la Hesbaye et les importantes failles de la Campine.

D'autre part, on constate également que le sud du bassin crétacé belge a été l'objet d'un vaste mouvement de relèvement. Il est très fissuré et très aquifère. Au contraire au nord, à Ostende, Gand, il y a eu repos géologique et la craie est restée compacte. Les causes géologiques ont ainsi joué un grand rôle dans la formation des fissures. M. Dawkins prétend que les fissures sont plus fréquentes dans les anticlinaux, tandis que la formation reste compacte dans un pli synclinal. Les grosses fissures se produisent donc dans les parties les plus tendres et les plus plissées.

Dans un même gisement géologique, comme la craie, les localisations de courants peuvent se produire en certaines régions et non en d'autres, ainsi que le constatèrent par exemple MM. de la Fontaine et Van Estborn dans la région du Geer (3) et sur les hauts plateaux du sud.

D'autre part, les diaclases capables de fournir un débit un peu appréciable sont très limitées. On peut creuser un

(1) Gosselet, *Annales de la Société géologique du Nord*, 1904, t. XXXIII, p. 133.

(2) D'Andrimont, Note sur les conditions hydrologiques de la Campine. *Revue universelle des Mines*, 1905, 4e série, t. IX.

(3) Geer, *Bulletin Société belge de géologie*, 1900, p. 302.

puits sans rencontrer d'eau ou en quantité peu appréciable, tandis qu'à quelques mètres de là soit au-dessous, soit au-dessus, soit à côté, on peut tomber sur un courant souterrain.

Ainsi un puits creusé à Péruwetz, par M. Durufour, avait percé vainement le calcaire sans rencontrer d'eau jusqu'à 100 mètres du sol. En désespoir de cause, il continua à creuser et à 103 mètres il rencontra l'eau jaillissante maintenue en pression par la roche elle-même.

Dans le bassin de Londres, au puits de Lea Bridge Station, on avait creusé un puits de 200 pieds de profondeur et, de ce point, prolongé des galeries en tous sens en ne trouvant que des quantités d'eau inappréciables. On eut alors l'idée de creuser une galerie horizontale simplement à 150 pieds et on rencontra une crevasse aquifère qui donnait 13000 mètres cubes d'eau par jour (1).

Dans le même ordre d'idées, Whitaker signale dans le Suffolk des puits qui ont rencontré des courants souterrains, tandis qu'à 9 mètres seulement de là la roche est presque compacte.

En trois endroits voisins le même auteur signale qu'on trouve l'eau à des niveaux très différents, respectivement à 202 pieds, 380 pieds et 580 pieds.

Pour M. Martel, ces différences de niveau dans les puits tiennent à deux causes. Ou bien les diaclases inférieures sont colmatées par des tampons d'argile provenant de la décalcification des terrains un peu marneux comme la craie, ce qui arrête les eaux en profondeur. Ou bien encore, au-dessous des puits, on trouve des diaclases d'importances diverses. Les plus grosses, drainant facilement les eaux de pluie infiltrées, empêchent le niveau de monter, les plus faibles au contraire n'évacuent pas très vite ces mêmes eaux, d'où relèvement du niveau des puits.

Il est encore une troisième cause dont nous avons déjà

(1) P. Van Ysendick. *Société belge de géologie*, t. XIII, 1899, M, p. 267 à 303.

parlé, ce sont les alternances de roches perméables et imperméables d'une même formation géologique.

A Lille, par exemple, quand on creuse un puits on ne trouve pas l'eau à la même hauteur.

D'après M. Gosselet, professeur de géologie à Lille, on trouverait le dispositif suivant :

Le calcaire carbonifère, dur et compact comme le marbre, est imperméable, mais entre les bancs calcaires

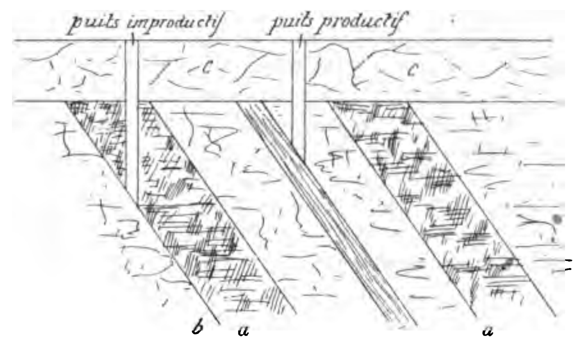


Fig. 30. — Coupe d'après M. Gosselet, dans la région de Lille.

a, *a*, couche schisteuse perméable ; *b*, calcaire carbonifère compact ; *c*, craie.

il y a souvent de petites couches schisteuses perméables.

A Lille encore, dans le quartier de Wazemmes par exemple, on traverse :

1 à 3 mètres de limon, 12 mètres de craie assez compacte avec une petite nappe vers le bas, puis le *tun*, craie dure et solide imperméable avec nodules de phosphate de chaux, enfin au-dessous une nappe aquifère très riche préservée par les infiltrations superficielles.

Dans la région de l'Escaut, grâce au tun, on trouve plusieurs niveaux d'eau superposés dans la craie. Mais il existe encore des massifs de craie blanche tellement compacte qu'ils sont très pauvres en eau.

Si les calcaires étaient uniformément perméables et fissurés et si la nappe souterraine avait toujours un écoulement uniforme, les pluies n'auraient qu'un effet peu appréciable sur le niveau des nappes souterraines. Il n'en est pas ainsi, sauf quelques exceptions, car dans les calcaires une pluie de 20 millimètres en hiver, augmente de plusieurs décimètres le niveau de certains puits. C'est qu'il se produit, par ruissellement interne sur la partie la moins perméable, une concentration des eaux en certains points. Tout se passe comme à la surface d'un sol argileux où les eaux ruissellent et viennent s'accumuler vers le thalweg des vallées. Les fissures, comme les vallées, au fur et à mesure qu'elles reçoivent un plus grand débit, deviennent plus importantes.

On aurait tort de croire que les grosses fissures sont situées de préférence près de la surface du sol. On les trouve à toutes les profondeurs. Souvent, surtout dans les calcaires primaires et à la base du secondaire, la fissure est au milieu d'une roche peu perméable. Les eaux maintenues par un toit et un fond imperméable sont sous pression. Qu'on arrive à crever ce plafond, il y a quelquefois jaillissement ou simple montée d'eau plus près de la surface du sol. L'hydrologie de ces terrains fissurés est donc une science délicate, et avant d'appliquer tel ou tel des moyens d'investigation que nous indiquerons, il importe de se rendre compte de la véritable nature des roches qui constituent le gisement géologique.

Un lit de marne peu épais ($0^m,10$ à $0^m,40$) est insuffisant pour limiter une fissure en profondeur et retenir complètement les eaux, comme on peut s'en rendre compte dans le Bajocien près de Toulon, de Nancy.

Les explorations spéléologiques et principalement les travaux de M. Martel ont bien montré la complexité de la circulation souterraine dans les terrains fissurés. Certaines parties calcaires tendres se sont dissoutes, et ont formé des poches pénétrables à l'homme, véritables

cavernes. On en a trouvé dans tous les terrains calcaires et à toutes les époques géologiques. Ainsi, comme exemple, nous citerons la grotte de Sorèze (Tarn) dans le Précambrien, celle de Han-sur-Lesse (Belgique) dans le



Fig. 31. — Rivière souterraine : Le Brudoux (Drôme), d'après E.-A. Martel.

Devonien, celle de Yorkshire (Angleterre) dans le Carbonifère, celle de Bramabiau (Gard) dans l'Infralias, les cavernes des Causses dans le Jurassique, les abîmes du Devoluy dans la Crétacé inférieur, la caverne de Trépail (Marne) dans la craie, la grotte de Villeneuve-d'Agen dans le Miocène, etc.

Si, sur le parcours du canal rocheux, il vient à se

produire un barrage, un lac souterrain se forme, constituant un réservoir caché. Nous citerons les lacs souterrains trouvés au Trou du Souci en Bourgogne, à la grotte de Dardennes (Var) qui contribue à l'alimentation de la source de la Balme près de Toulon, au puits des Vaux (Furfooz) dans le calcaire carbonifère, à la grotte de Costozza (Italie), etc.

L'écoulement de ce lac peut se faire soit par une fissure de fond, c'est-à-dire par un gouffre dont nous allons retrouver bientôt quelques exemples, soit par un canal

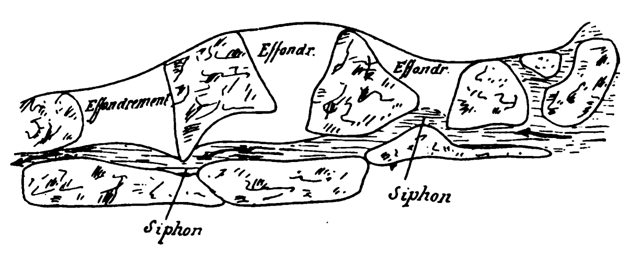


Fig. 32. — Grotte de Marble Arch.

étroit, soit par un déversoir formant *cascade* comme dans les grottes de Bramabiau, de Brudoux, de Trépail.

Une régression analogue à celle observée aux chutes du Niagara se manifeste parfois dans les cascades souterraines. Les eaux entamant progressivement le calcaire, M. Martel a reconnu à Bramabiau une régression de plusieurs mètres, au bout de quelques années seulement.

La sortie d'un lac peut encore se faire par le dispositif suivant indiqué par M. Martel. Les eaux remontent le long d'une fissure verticale jusqu'au moment où elles trouvent une branche descendante exactement comme dans un siphon, terme pour lequel du reste M. Martel désigne ce mode d'écoulement. On trouve ce dispositif dans les cavernes de la source de Vaucluse, de la source de la Sauve (Gard) ou encore à Marble Arch (fig. 32).

5.

Le siphon au lieu d'avoir son repli en haut peut l'avoir en bas. Dans ce cas on voit les eaux d'un lac arriver en bouillonnement par le fond comme à la grotte de Corveissiat (Ain).

Ce travail incessant d'élargissement des fissures se fait



Fig. 33. — Bramabiau (Gard), cascade souterraine (d'après Martel).

aussi bien dans le sens vertical que dans le sens horizontal. Ainsi les eaux engouffrées, réunies par ruissellement dans les thalwegs des vallées, rencontrent continuellement la même fissure, l'agrandissent et finissent par établir entre la surface du sol et les diaclases souterraines une cheminée plus ou moins large qui a reçu différents

noms. A noter tout de suite que la cheminée a pu être créée de bas en haut par effondrement souterrain du toit d'une caverne. On comprend en effet que par suite du travail incessant d'affouillement la partie supérieure

Fig. 34. — Aven de lou Cervi (Vaucluse) (d'après Martel).

d'une grotte cède sous la charge de terre qui l'écrase et celle-ci, remplissant le vide, forme une cavité conique à la surface du sol. Mais partout où il y a des cavernes il n'y a pas certainement d'effondrement. Comme à Trépail le terrain peut être suffisamment résistant pour s'opposer à la chute du toit de la caverne. Voici les noms qu'on donne à ces cheminées dans les différents pays : evens

(Hérault), chouruns et scialets dans la Drôme et le Dauphiné, tinbucs dans les Bouches-du-Rhône, aiguigeois en Belgique, emposieux en Suisse et dans le Jura, mardelles et bétoires en Normandie, ragagé dans le Var, tindouls dans l'Aveyron, igues dans le Quercy, pertes et gouffres dans la Côte-d'Or, sanglöcher, dolines, foibe, trichter, schacht en Autriche, poniqué, ponor, katavothres dans les Balkans, pot-holes, swallow-holes, slugges dans les Iles Britanniques, algares ou algarves dans le Portugal, englolidois, fosse, zubbi, busi en Italie, cerrotes (Yucatan), hoyos en Colombie, sink holes aux États-Unis. Ces mêmes accidents se produisent dans le sol et permettent ainsi aux eaux de s'engouffrer plus profondément. L'importance de ces cheminées est telle que certaines rivières ou fleuves, comme la Seine à Châtillon-sur-Seine, sont complètement absorbés par elles. Ces eaux circulent alors dans les fissures du sol et forment ce qu'on appelle des *rivières souterraines* (1).

Nous avons vu que dans les différents terrains les fissures étaient très limitées et de directions déterminées. Il est évident que si une vallée est parallèle à la direction du pendage ou des diaclases, les eaux qui s'engouffrent dans le sol pourront trouver sous la vallée même des joints de stratification ou des diaclases qu'elles agrandiront progressivement et la même action dissolvante se reproduisant tout le long de la vallée, c'est sous celle-ci qu'on aura des chances de rencontrer un courant souterrain important. Mais ensuite, après avoir eu une direction

(1) *Glacières naturelles.* Dans certaines grottes on rencontre de la glace en abondance, témoin les glacières naturelles de l'Œtscher et de Dobschau, la plus grande connue.

D'après Krenner, la formation de cette glace est due :

1° A la forme descendante de la caverne ;

2° Au rétrécissement de l'ouverture et à celui des fissures qui servent à l'échappement de l'eau de fusion.

3° A l'orientation de l'ouverture vers le nord ;

4° A la chute des neiges et de l'air froid de l'hiver par cette ouverture;

5° A la forme de la grotte qui empêche en été la circulation de l'air chaud.

parallèle au pendage, il arrive souvent que la vallée change brusquement de direction. Dans ce cas les eaux souterraines, en partie du moins, continuent leur chemin dans la direction de la stratification ou des diaclases, quittent la vallée et circulent sous le plateau. Nous reparlerons de ces faits importants plus tard, faits qui se vérifient à la Bonneville et à Évreux pour l'Iton (fig. 35), à Pontarlier pour le Doubs, à la Vanne pour les sources

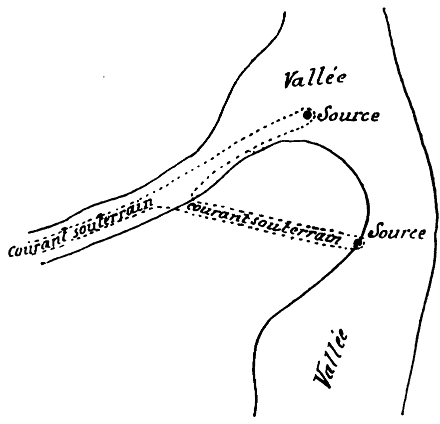


Fig. 35. — Coupe horizontale dans la vallée de l'Iton, en amont d'Évreux.

d'Armentières. On a signalé quelques exceptions. M. Dupont a constaté que les sources de la vallée du Bocq sortent du calcaire non dans le sens de la pente des bancs, mais dans une direction sensiblement perpendiculaire et dans le sens opposé à leur inclinaison. Ce cas semble très rare.

M. Gosselet, dans la craie du nord de la France, a également trouvé que généralement les principaux canaux souterrains sont dans les vallées (1) ou à leur proximité.

(1) Gosselet divise sa craie fragmentaire, roche meuble comparable à un conglomérat, en deux parties : 1° Craie fendillée, rare sur les plateaux, très

On rencontre dans les granits des fissures (fig. 36) donnant un peu d'eau, comme nous le verrons par la suite. En Amérique il n'est pas rare de voir se former des



Fig. 36. — Granites fissurées du cap Land's End.

crevasses dans les granits sous l'influence des incendies de forêts ou de prairies. Les basaltes, les porphyres sont également fissurés superficiellement comme les granits.

épaisse dans les vallées, très riche en eau et formée par les agents atmosphériques (pluies, sécheresses, gelées, chaleur) ; 2° Craie congloméroïde : ressemble à de la craie remaniée, mais est intercalée entre des couches régulièrement stratifiées, semble s'être formée par dissolution en profondeur. M. Van den Broeck fait des réserves sur ce point. Elle manque sous les plaines ou les plateaux.

Certains gneiss sont très peu perméables et ne présentent pas la perméabilité en grand. Ils ne laissent passer un peu d'eau que dans les parties décomposées par kaolinisation du feldspath (gneiss d'Antigorio en Suisse).

Les terrains volcaniques, comme les laves, sont très perméables.

Par métamorphisme le terrain sous-jacent est devenu imperméable et les eaux souterraines s'acheminent par la pente de ces terrains. On signale même des absorptions d'eau importantes dans les laves (lac d'Aydat).

Les terrains schisteux ne sont pas toujours imperméables. Il arrive souvent qu'ils donnent des eaux par leurs joints de stratification et de schistosité. Sous les influences extérieures ces joints se délitent et l'eau arrive à descendre jusqu'à une profondeur de 10 mètres. La roche en dessous est compacte. Les diaclases des schistes drainent les eaux accumulées dans les joints de schistosité. Les plissements favorisent la fissuration.

Les grès infraliasiques sont très fissurés dans le Luxembourg, ils le sont moins en France. A Varangeville (Meurthe-et-Moselle) la Société Solway a trouvé beaucoup d'eau dans ces terrains, mais celle-ci venait de l'infiltration de nappes de terrains supérieurs.

Certaines formations détritiques, dont les éléments sont agglomérés, peuvent être fissurées, comme par exemple les poudingues de Montserrat.

Mais incontestablement ce sont les terrains calcaires qui sont les plus fissurés, ainsi que les gypses. Dans ces derniers terrains on y trouve très fréquemment des cavernes (Trou-de-Tonnerre (Seine-et-Oise), Triel, Taverny, Rampillon, etc.).

Dans la région du Condroz, en Belgique, on trouve la réunion de trois types de terrains de perméabilité différente : des schistes, des psammites (grès formés de grains de sable cimentés par de l'argile) et des calcaires carbonifères

Dans les calcaires ce sont les fentes et cavités naturelles de la roche qui acquièrent le plus d'importance et conduisent le mieux les eaux pluviales.

Dans les psammites les cavités naturelles manquent, les fentes sont moins répandues et plus étroites que dans les calcaires, la circulation de l'eau y est plus difficile quoique la roche soit plus poreuse. Dans le Condroz les fentes sont parallèles aux axes des anticlinaux, c'est-à-dire très mal disposées pour conduire les eaux. Dans les houilles de l'Ardenne les psammites peuvent être perméables.

Dans les schistes de cette région la circulation y est encore plus difficile.

Ces roches décomposables, sous l'action des agents atmosphériques, en argile imperméable, empêchent généralement l'infiltration des eaux météoriques. Or la galerie de drainage dite de Malines, percée par la ville de Charleroi, a longuement traversé des roches analogues, quartzo-schisteuses. En beaucoup d'endroits on a observé que les psammites sont très fissurés et qu'il ne fallait pas tenir d'une façon générale les schistes comme imperméables.

Toutes les diaclases d'un terrain s'anastomosent en général les unes les autres, et l'écoulement de l'eau se faisant dans un sens déterminé, la partie des eaux d'une diaclase peut, pour une cause quelconque comme l'augmentation du débit, s'acheminer vers une diaclase voisine.

Toutefois il y a des cas où on ne peut admettre cette anastomose complète. M. Martel cite à ce sujet la grotte de Holl-Loch en Suisse.

Les causes qui peuvent faire baisser le débit d'une diaclase constituent ce qu'on appelle un changement de régime, et tiennent généralement à des effondrements souterrains, le plus souvent sans relation avec la surface du sol. Mais cela tient également à l'abaissement des

eaux après la sécheresse persistante. Par exemple on a constaté que les eaux du gouffre de Gros-Gadeau près de Salins communiquent en hiver avec toutes les sources de Saizenay ; en été, au contraire, elles ressortent à l'aval de ces fontaines. De même les eaux engouffrées à l'entonnoir de Baulmes près du Mont de Chamblon communiquent, d'après Schardt, avec toutes les sources du Moulinet en saison humide, avec seulement les sources les plus en aval en saison sèche.

Dall et Harris ont également donné un exemple frappant de variations de régime hydrologique.

Près de Gasneville (Floride du Nord) existait autrefois le lac d'Alachua. Il disparut en 1823 et fut remplacé par un petit ruisseau qui disparaissait dans un gouffre ou *Sink*. En 1873, après de grandes pluies, le lac se reforma et subsista jusqu'en 1889. Son importance était telle que de petits vapeurs le sillonnèrent. Son niveau commença à baisser en 1889, mais en 1891, pour une cause inconnue, le lac disparut complètement en quatre semaines. Une désobstruction de courant souterrain s'était probablement produite sans cause apparente.

La ligne de plus grande pente des eaux de ces terrains n'est pas toujours très fixe et peut tourner de 45°, comme M. Jottrand (1) l'a constaté.

De même, contrairement à ce qui se passe pour les terrains perméables en petit, la ligne de partage des eaux souterraines peut se déplacer latéralement suivant les saisons.

Les tremblements de terre ont également une certaine importance, comme nous le verrons au chapitre suivant.

Comme conséquence il faudra toujours compter sur ces changements de régime et les fluctuations de débit qui en résultent lorsqu'on cherchera à utiliser ces eaux souterraines. De même que les grosses diaclases, les

(1) Jottrand, *Bulletin Société belge de géologie*, p. 184, 1896.

failles ont comme nous l'avons dit, une grande importance. Elles peuvent drainer l'eau des terrains qu'elles recoupent. Nous savons encore qu'elles peuvent faire descendre les eaux d'un étage supérieur dans un étage inférieur (faille d'Autun-le-Tiche (fig. 37).

Dans les terrains à startification horizontale, les nappes phréatiques (1) sont peu mobiles.

De même que pour les terrains sableux, comme

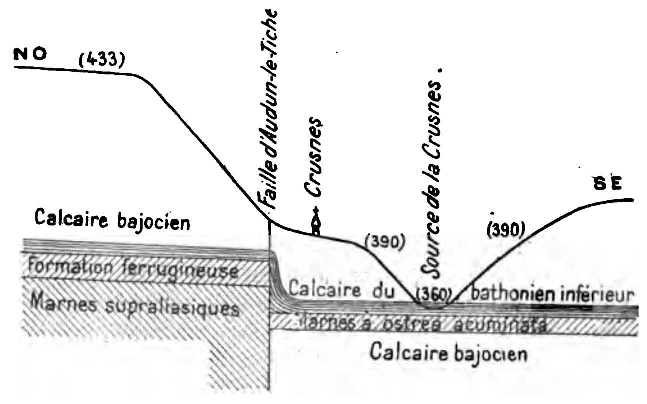


Fig. 37. — Influence d'une faille sur les eaux souterraines (d'après l'atlas Imbeaux).

D'Andrimont l'a montré, la circulation de l'eau dans les couches superficielles des terrains fissurés peut avoir une direction opposée à celle circulant en profondeur.

Ainsi par exemple dans la vallée de la Vanne on trouve à la partie supérieure de la nappe des eaux phréatiques se dirigeant du sud-est au nord-ouest, tandis qu'en profondeur on rencontre des diaclases dont les eaux se dirigent du nord au sud.

(1) On appelle nappe phréatique celle qui, la plus voisine de la surface du sol, alimente la majorité des puits.

Il est évident que ces deux circulations sont indépendantes, les eaux profondes circulant dans un massif calcaire séparé de la partie superficielle du sol par une partie de roche imperméable ou peu perméable.

Schématiquement la figure 38 représente le dispositif qui donne naissance à la source de Noë. Souterrainement on peut admettre que des eaux venant de la partie droite de la figure s'échappent de la grosse diaclase qui les conduit à la source de Noë après avoir traversé la Vanne. Ces eaux échappées vont rejoindre celles qui circulent dans

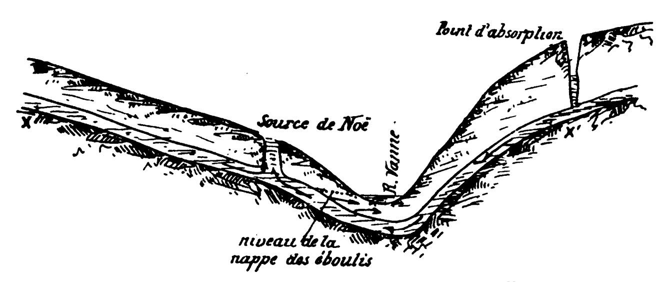


Fig. 38. — Coupe transversale à la vallée de la Vanne.

les alluvions de la vallée en suivant le chemin inverse du courant souterrain, comme les flèches l'indiquent.

La mer s'engouffre quelquefois elle-même, comme sur les rivages de l'île Céphalonie. On ne sait trop où ces eaux vont ressortir.

D'autre part, la mer constitue quelquefois un obstacle à l'écoulement des eaux douces dans les terrains fissurés. On retrouve encore le même dispositif indiqué figure 28 pour les Dunes, mais comme les fissures sont plus larges, l'influence de la diffusion du sel peut se faire sentir plus loin des rivages (15 à 20 kilomètres de la mer).

Cette revue rapide de la circulation des eaux à travers les terrains perméables en grand trouvera son application dans les études ultérieures.

Nous aurons même l'occasion de compléter les détails de cette circulation au fur et à mesure que nous ferons connaître les méthodes d'investigation employées en hydrologie.

Nappes. — Une grande discussion s'est engagée pour savoir si dans tous les terrains et à une certaine profondeur, les eaux souterraines formaient une couche unique au milieu des espaces lacunaires ou des roches fissurées; en faisant toutefois remarquer que la surface de cette couche ne doit pas être plane puisque l'eau rencontre dans son écoulement des obstacles nombreux. M. Martel n'admet pas l'existence de nappes d'eau dans les calcaires et ne suppose leur présence que dans les terrains perméables en petit.

Pour notre part nous admettons l'idée d'une nappe dans certaines parties des terrains fissurés parce que l'observation a montré qu'aux sources de la Vanne on trouve des ouvrages qui drainent sur plusieurs kilomètres, et d'une façon à peu près uniforme, des eaux circulant dans la craie, et nous nous rallierons très volontiers à l'opinion de M. Rutot qui admet l'existence de nappes dans certains calcaires à allure horizontale et régulière comme ceux de Tournai, et leur non-existence dans les calcaires fissurés comme ceux de Rochefort en Belgique.

Certains auteurs même, comme M. François, prétendent que dans tout calcaire il y a deux circulations : l'une supérieure par canaux, l'autre inférieure, ruisselant sur la couche argileuse imperméable et formant une nappe. Il est évident que ce terme de *nappe* introduit dans les esprits de graves confusions, et le but de M. Martel est surtout de réagir contre un mot dont la mauvaise interprétation peut amener de graves mécomptes.

En effet, quand une couche d'eau s'étend en nappe sous la surface d'un terrain, on suppose qu'en creusant un puits dans un endroit déterminé on trouvera toujours de l'eau. L'expérience a montré que cela était vrai dans

la craie du bassin de Paris par exemple, mais était inexact dans certains calcaires carbonifères où la circulation par canaux semble le plus répandue. Toutefois il n'est pas rare de rencontrer dans les calcaires des nappes locales, qui à un certain moment débouchent par un canal souterrain, comme nous le verrons dans la craie elle-même (1).

De même dans les gypses, les nappes locales, se formant sur une couche argileuse débouchent très souvent tout à coup dans le gypse soluble dans lequel elles creusent des canaux. En un mot, il se reproduit dans le sol comme à sa surface des amoncellements d'eau, des ruissellements et des évacuations, et on pourrait désigner ces terrains sous le nom de terrains à *nappes multiples* sans préjuger de leur dépendance et de leur importance. Réunir les différentes nappes d'un gisement perméable en grand et les désigner sous le nom de *nappes à niveau*, comme le font MM. Debauve et Imbeaux, ne représente guère une image suffisamment exacte des phénomènes souterrains. Tandis qu'en les désignant sous le nom de terrains à *nappes multiples*, nous expliquons par ce fait qu'on peut les atteindre à différents niveaux au-dessous du sol et qu'on ne doit pas se baser sur la profondeur d'un puits pour en établir un autre proche. C'est à peu près tout ce qu'on doit demander à une telle désignation. Quant au terme de nappes, il est tellement commode qu'il sera très difficile de ne pas l'employer même dans le cas où la circulation souterraine est nettement par courants souterrains.

(1) On trouve très souvent par exemple au-dessus du calcaire à entroques (Bajocien) ou de la craie, des terrains détritiques, perméables en petit, renfermant de petites nappes. Quand la couche imperméable, qui supporte cette nappe locale, vient à manquer, les eaux s'écoulent dans le terrain calcaire sous-jacent. A Oudan (Nièvre) l'écoulement localisé de ces eaux a réussi à dissoudre le calcaire et à provoquer un effondrement. Depuis on aperçoit le courant d'eau qui sort des terrains détritiques sur les flancs de l'entonnoir et se perd immédiatement dans l'effondrement.

Nous réservons sous le nom de *nappe unique*, la couche d'eau qui imprègne les terrains perméables en petit comme les sables, les graviers.

V

DES SOURCES

En parlant de la circulation dans les terrains perméables en petit nous avons eu l'occasion de citer la formation des sources de ces derniers. Ce chapitre sera donc principalement consacré aux sources des terrains perméables en grand.

Le débouché à l'air libre des nappes d'eau contenues dans les différents terrains, dont nous venons de voir la circulation souterraine, constitue ce qu'on appelle une source. Pour certains hydrologues on réserve le mot *source* à l'arrivée des eaux souterraines provenant de l'infiltration des eaux pluviales à travers les multiples fissures ou les espaces lacunaires des différents terrains; au contraire, on emploie le mot *résurgence* pour désigner la réapparition d'eaux fluviales ou de rivière absorbées dans un gouffre quelconque.

Pratiquement la source se forme là où un courant arrive au jour, le mot courant étant pris dans le sens général que nous lui avons donné et s'appliquant également à ces directions d'écoulement facile qu'on retrouve dans les sables toujours plus ou moins argileux.

Dans les terrains fissurés l'arrivée au jour peut se faire soit par affleurement de la diaclase, soit encore par suite de l'effondrement d'une partie d'une diaclase dans laquelle les eaux étaient en pression. L'effondrement crée ainsi une cheminée par laquelle remontent les eaux en pression comme à la source de Noë (fig. 38).

Debauve et Imbeaux classent les sources en :

1° Sources filoniennes ou diaclasiennes qui sortent de terre par des diaclases ascendantes et font revenir au jour les eaux profondes relativement chaudes et assez minéralisées.

2° Les sources de déversement ou d'affleurement. Elles sont produites à l'affleurement d'une couche de terrains imperméables sur le flanc d'une vallée.

3° Les sources d'émergence ou de thalweg formées par l'affleurement du niveau piézométrique d'une nappe avec la surface du sol et non pas par l'affleurement d'un terrain imperméable.

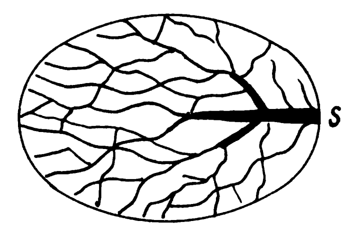


Fig. 39. — Schéma d'une circulation souterraine (d'après M. Janet).

Par terme de source on entend souvent, non seulement les écoulements d'eau qui sortent de terre et constituent des ruisseaux pérennes ou intermittents, mais encore les diaclases alimentant un puits (1).

En projection horizontale, principalement en terrains fissurés, on peut schématiser le réseau alimentant une source ainsi (fig. 39) : une diaclase unique reçoit de l'eau de plusieurs grosses diaclases lesquelles drainent les eaux venant d'une série de canaux plus ou moins fins. Sur le trajet de ces canaux, on peut supposer la présence de grottes, lacs, etc.

En terrains très perméables reposant sur une couche argileuse tout à fait imperméable, c'est la direction de la couche argileuse qui ordonnera la position de la source.

Dans la figure 40 représentant un terrain perméable

(1) Il est évident qu'un puits qui recoupe une diaclase constitue une source si, par un moyen quelconque, on peut remonter cette eau à la surface.

en petit reposant sur une couche argileuse dessinant plusieurs thalwegs dont un principal et plusieurs secondaires, on trouve dans chacun d'eux plusieurs sources d'importance inégale. La plus importante est la source

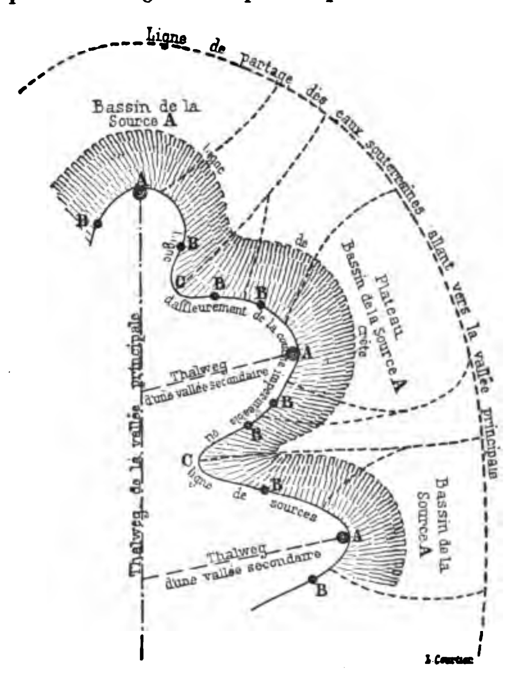


Fig. 40. — Figure extraite de l'ouvrage de MM. Debauve et Imbeaux.

située à la base du thalweg principal. Puis viennent par ordre d'importance les sources A des thalwegs secondaires, puis les sources B de très faible débit. En C, ligne de faîte, on ne trouve pas de source.

En terrain perméable en grand les sources les plus volumineuses sont en relation avec de grandes fissures

ou des failles. Les sources, jaillissant des fissures ou des strates sont plus profondes que celles provenant des rivières souterraines proprement dites.

Les sources principales se trouvent toujours sur le grand versant d'un plateau. Sur le petit versant les sources ont une moindre importance et sont désignées sous le nom de *sources de contre-versant*.

Dans les terrains granitiques, gneiss, schistes, les sources sont généralement très peu importantes et souvent tarissent en été, de même dans tous les terrains imperméables où la production des sources très nombreuses et de très faible débit est due à la présence des éboulis provenant des plateaux voisins.

Dans les terrains perméables en grand, il y a bien moins de sources, mais elles sont plus importantes.

L'influence des failles est très importante sur l'emplacement des sources. Daubrée dans son livre sur la circulation souterraine a fait voir l'influence de cet accident géologique. En effet, la faille peut faire remonter l'eau d'une diaclase parce qu'elle a eu pour résultat d'opposer à l'écoulement des eaux un mur infranchissable comme dans la figure 40. Les filons de quartz facilitent l'arrivée au jour des eaux profondes (Saint-Maurice dans la Creuse) et se comportent comme une faille.

Très souvent la source n'est pas en place parce que le flanc du coteau est recouvert d'éboulis au travers desquels les eaux souterraines circulent (fig. 42).

La source de la Dhuys, captée par la Ville de Paris, circule bien sur les marnes à *Pholadomya ludensis*, mais vient déboucher à travers les éboulis de la vallée.

Dans la vallée de Brenon (Meurthe-et-Moselle), par exemple, on voit plusieurs séries de sources à différents étages. On attribue ce fait à l'accentuation de la pente de la vallée. Quand les pentes sont plus douces les eaux circulent à travers les éboulis et les sources formées dans le thalweg de la vallée sont constituées par la réunion

des eaux de plusieurs nappes superposées (fig. 43). Quelques petites sources se sont néanmoins fait jour le long de la pente du plateau.

Même pour les pentes très raides, il est assez difficile de

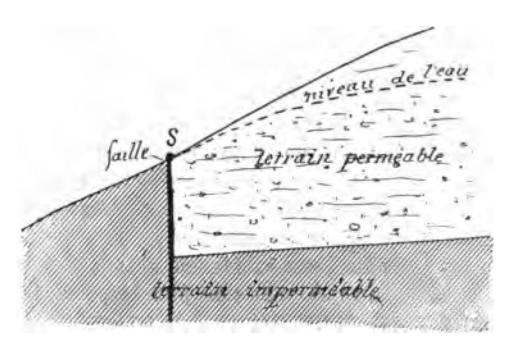


Fig. 41. — Formation d'une source sous l'influence d'une faille.

dire *à priori* si une partie des eaux n'échappe pas aux sources hautes pour venir se mélanger aux sources

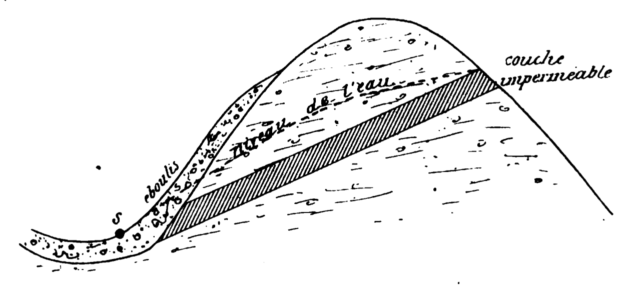


Fig. 42. — Source prenant jour à travers les éboulis.

basses. Nous verrons plus loin comment on peut élucider ce problème.

Les variations de régime des eaux souterraines ont une répercussion sur les sources. Un gouffre, au moment

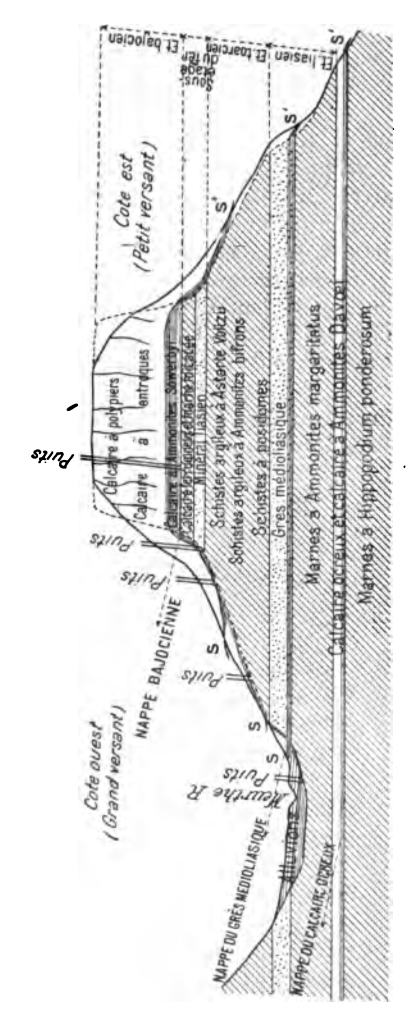


Fig. 43. — Coupe schématique de l'est à l'ouest du plateau de **Malzeville** et de la vallée de la **Meurthe**.

des grandes eaux, peut former source et même un lac (lac d'Eichen en Allemagne), constituant une cheminée par laquelle l'excès des eaux souterraines peut facilement s'écouler.

Comme nous le verrons plus loin, les tremblements de terre ont également une très grande répercussion. Certaines sources, à la suite de ces accidents sismiques, baissent de débit ou même tarissent très souvent temporairement (source de Brousse en Asie Mineure). A la source de Louèche l'effet fut inverse et le débit augmenta en 1855, à la suite d'un tremblement de terre.

Source intermittente. — Il arrive quelquefois que certaines sources ne coulent qu'à des espaces de temps indéterminés.

Pour expliquer leur fonctionnement, voici ce que dit Darcy : « Pour qu'il y ait production d'une fontaine intermittente, il faut qu'un courant d'eau souterrain tombe dans une cavité et que de cette cavité sorte un siphon naturel, intermédiaire, nécessaire entre la cavité et le point d'émergence.

« Il faut, de plus, que le siphon puisse débiter un volume plus grand que le volume naturellement amené dans l'excavation.

« Alors, supposons que le siphon marche ; il videra la cavité, et la source débitera le volume qu'il donne ; la cavité vidée, l'air rentrera dans le siphon, et la source s'arrêtera.

« Mais en même temps la grotte se remplira, et, lorsque le niveau de l'eau sera arrivé à celui de la partie haute du siphon, cet appareil recommencera à jouer, et ainsi de suite.

« Pour obtenir une fontaine intercalaire, il suffit d'imaginer que la ramification qui donne l'eau à la grotte se subdivise et qu'une des branches se vide directement au bassin de la fontaine. On voit que le minimum du débit correspondra au moment où cette seconde branche

donnera seule, et le maximum à l'instant où son produit s'ajoutera au volume maximum du siphon.

« Pour se rendre compte de fontaines intermittentes composées, il suffit de supposer deux cavités communiquant par un siphon. La plus grande de ces cavités sera située en amont de la plus petite ; admettons encore que le siphon qui communique à la fontaine débite un plus grand volume que celui qui réunit les grottes, et qu'enfin chacun d'eux laisse couler un volume supérieur au produit naturel de la source.

« Alors il est évident que la grande cavité enverra à la petite plus d'eau qu'elle n'en reçoit ; elle finira donc par se vider : la petite, à son tour, sera mise à sec plusieurs fois pendant que la grande cavité se désemplira, l'eau qu'elle renferme étant emportée par le siphon du plus fort calibre. De là les petites intermittences, et la grande correspondra au temps nécessaire pour remplir de nouveau la grande grotte.

« Que l'on ajoute maintenant à cet appareil naturel, une ramification du cours principal se rendant directement au bassin de la source, et l'on aura ce qu'on appelle une fontaine intercalaire composée.

« Maintenant, que pendant la saison des pluies de nouvelles sources se développent, qu'elles produisent au minimum ce que le siphon des fontaines intermittentes ou intercalaires peut débiter, alors le régime de la fontaine passe à l'uniformité.

« Veut-on un exemple d'une fontaine qui coulerait pendant l'été et s'arrêterait lorsque le débit des sources augmente en général ? Que l'on imagine, dans la grotte de la fontaine intermittente simple, un orifice placé à une certaine hauteur au-dessus de l'extrémité de la contre-branche du siphon. Si cet orifice peut emmener tout ce que le conduit naturel fait arriver, cet orifice donnera naturellement lieu à une source d'un débit non interrompu. Si l'eau augmente et que l'orifice précité ne

6.

puisse pas donner écoulement à tout le nouveau volume, la cavité se remplira, le siphon pourra s'amorcer, et, s'il débite plus que le conduit qui amène les eaux à la grotte, celle-ci se videra, et par conséquent la fontaine à laquelle l'orifice précité donne naissance deviendra périodique, comme celle à laquelle le siphon envoie les eaux. Enfin, si le volume du conduit principal augmente encore et s'il est égal à celui débité par le siphon, le plan des eaux étant dans la grotte au-dessous de l'orifice, il est manifeste que la fontaine qu'il desservait cessera de couler, tandis que celle du siphon deviendra uniforme.

« Il existe en Angleterre plusieurs de ces fontaines qui coulent en été et s'arrêtent pendant l'hiver.

« Voilà déjà des résultats bien variés, et je n'ai point fait entrer cependant en ligne les effets dus à la dilatation, à la compression, aux variations de température que l'air peut éprouver dans des conduits naturels.

« Que l'on suppose, par exemple, un point haut dans ces conduits, et qu'une certaine quantité d'air se loge à partir de ce point haut, dans la branche descendante. Pour un certain degré de température, la force élastique de l'air laissera l'eau franchir le point haut ; mais que cette température augmente, l'eau ne pourra plus surmonter la nouvelle élasticité développée, et l'écoulement s'arrêtera. »

VI

NAPPES ARTÉSIENNES

Ce que nous venons de dire de la circulation des eaux dans les différents terrains va nous permettre de comprendre ce qu'on entend par nappes artésiennes et par nappes captives.

Supposons une cuvette et dans son fond deux couches AA' et BB' concentriques d'un terrain imperméable.

Ces terrains imperméables peuvent être formés d'argiles ou de roches compactes non fissurées. La partie comprise entre les couches imperméables est supposée être perméable. L'eau qui tombe dans l'espace AB ou A'B' s'amoncelle entre les couches imperméables et demeure sans écoulement. L'écoulement se produit en A ou en A' quand le niveau devient suffisant. Qu'en C, on fonce un trou dans la couche imperméable supérieure, immédiatement l'eau jaillira à la surface du sol. C'est le dispositif qu'on trouve dans le bassin parisien dont Paris est

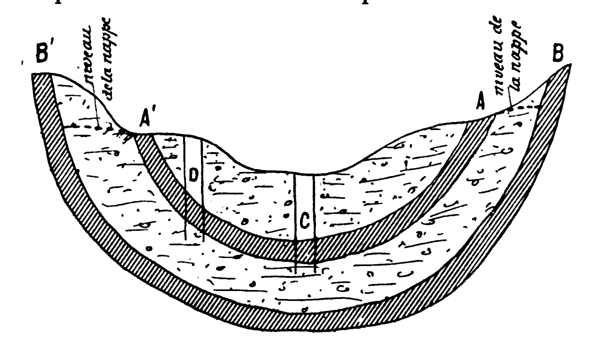


Fig. 44. — Formation d'une nappe artésienne.

un centre. Les puits de Grenelle, de Passy, ont donné de l'eau jaillissante aussitôt que l'argile du Gault, à la base du Crétacé, a été percée. Ces eaux sortent des sables verts.

Si au lieu de forer en C, on fore en D, l'eau, par suite des frottements, ne jaillira pas au-dessus du sol, mais elle occupera une certaine position au-dessus de la couche imperméable supérieure. De façon à réserver le terme de nappes artésiennes aux eaux qui, par forage, jaillissent au-dessus du sol, M. d'Andrimont propose pour le cas de toutes les nappes emprisonnées entre deux couches imperméables, le terme plus général de *nappes captives*.

Pour cet hydrologue une *nappe captive est une nappe ou partie de nappe dont les eaux sont maintenues sous pression par un toit moins perméable que l'assise qui le contient.*

Le dispositif indiqué précédemment pour la source de Noë est celui d'une nappe captive dans un terrain fissuré, la partie imperméable n'étant pas formée d'argile, mais de roche peu fissurée. L'emploi de ces nappes artésiennes est très précieux en Afrique. Deux nappes artésiennes importantes sont celles de l'oued Rirh en Algérie et l'oued Melah en Tunisie.

M. Gosselet signale la formation d'une autre espèce de nappe artésienne que nous indiquerons dans la deuxième partie.

Maintenant que nous avons indiqué ce qu'on sait de la circulation souterraine, il s'agit de passer aux moyens d'investigation dont on dispose pour arriver à connaître, dans le cas particulier d'une étude hydrologique, le caractère propre de la circulation souterraine.

Avant de commencer cette étude, nous devons indiquer assez brièvement quelques niveaux qui en France renferment de l'eau. Toutefois, pour les terrains quaternaires, nous avons cru utile de prendre un exemple en Allemagne.

VII

QUELQUES TYPES DE NAPPES AQUIFÈRES

Comme exemple de nappes aquifères nous indiquerons pour les terrains quaternaires les nappes de l'Allemagne du Nord, pour les terrains tertiaires et le secondaire supérieur les nappes du nord de la France, pour les terrains secondaires les nappes du département de Meurthe-et-Moselle, enfin pour les terrains primaires les terrains de l'Ardenne.

Il eût été intéressant de montrer pour toute la France

les différentes nappes qu'on rencontre ou qui peuvent être rencontrées en profondeur. C'eût été un travail très utile pour l'agriculteur à la recherche des eaux potables nécessaires à son alimentation. Mais l'étendue du sujet nous aurait entraîné bien au delà de l'étendue de l'ouvrage.

Nous ne parlerons pas des terrains primitifs ou volcaniques, car les nappes qu'on y rencontre sont de peu d'importance. Nous avons dit leur imperméabilité relative au chapitre IV, nous les retrouverons quand nous parlerons des moyens de se procurer de l'eau.

Nappes des terrains quaternaires.

Comme exemple d'eau trouvée dans les couches provenant de l'époque glaciaire, à l'époque quaternaire, nous citerons les graviers et les sables de l'Allemagne du Nord, remplissant quelquefois des cuvettes fort irrégulièrement délimitées en plan et constituant une série de petites nappes d'eau de peu d'importance chacune.

D'autres fois on rencontre de vastes plaines sableuses appelées *Saudr* en avant de la ligne des moraines terminales correspondant à la longue phase d'arrêt précédant la période de recul des glaciers. La puissance de ces sables est de 20 mètres et on y rencontre une puissante nappe souterraine; ainsi que dans les plaines des anciennes vallées des fleuves glaciaires. La puissance de la couche aquifère de ces terrains peut atteindre 30 à 40 mètres. Là encore on y trouve des intercalations de bancs de marnes argileuses qui forcent le courant souterrain à les contourner, c'est-à-dire à changer de direction. C'est à cette couche que s'alimente Berlin. Les eaux sont très riches en fer et quelques-unes en manganèse. Il y a pour cela quelques aléas à prendre de l'eau dans ces terrains, et nous verrons plus loin que la ville de Breslau vient d'en faire la décevante expérience. Toutes les nappes de

l'époque quaternaire sont dans des terrains perméables en petit.

Nappes du nord de la France.

Nappe des sables de Diest. — Nappe de sables grossiers ferrugineux retenue par une couche argileuse dépendant de l'assise à *Pecten corneus*. Se trouve sur la colline de Cassel et les environs de Bailleul.

Nappe des sables de Cassel. — Se trouve dans les collines flamandes. C'est une nappe contenue dans des couches sableuses faisant partie du Parisien et de la partie supérieure de l'Yprésien. Elle est retenue par l'argile des Flandres. Elle alimente plusieurs sources qui donnent naissance à quelques affluents de l'Yser ou se rendent à la Lys ; quoique d'après Gosselet la plupart des rivières du pays flamand ont leur origine dans la nappe superficielle du limon. La ville de Bailleul est alimentée par ces eaux des sables de Cassel.

Nappe des sables de Mons-en-Pévèle. — Sables de l'Yprésien supérieur donnant naissance à quelques sources comme celle de la Marcq ou des environs de Séclin. Ces sables ont une grande importance en Belgique où leurs eaux servent à l'alimentation de plusieurs villes, comme Bruxelles par exemple.

Nappe des sables landeniens. — L'eau de cette nappe est retenue par l'argile de Louvil ou le conglomérat à silex. On rencontre souvent de petites nappes locales fournies par des bancs argileux imperméables comme dans la forêt de Soignes (fig. 21). On pourrait donc assimiler cette nappe aux nappes multiples des terrains fissurés.

Les sables landeniens forment des buttes isolées de faible étendue. Les sources qui en sortent sont de peu d'importance. Cette nappe sert à l'alimentation de nombreux puits entre Valenciennes, Saint-Amand,

Seclin et Cysoing. Cette couche sableuse s'enfonce vers le nord. Dans la Flandre elle sert également à l'alimentation d'un grand nombre de puits (La Madeleine, Armentières, Roubaix, Tourcoing, Roncq, Launoy).

Nappe de la craie. — L'importance de cette nappe est considérable. Elle donne naissance à de nombreuses sources. La craie est en effet très fissurée du côté de Valenciennes par exemple et rend excessivement pénible l'exploitation des mines, à cause des venues d'eau très importantes.

L'eau des puits artésiens vient de la craie quand celle-ci est recouverte d'argile de Louvil.

Nous avons vu que dans le crétacé du nord on trouve des eaux retenues par des couches imperméables formées au sein de la craie par l'agglomération de particules crayeuses et de phosphate de chaux formant le *tun*.

De même dans la craie à silex on trouve des quantités d'eau importantes à différents niveaux par suite de l'intercalation de lits marneux. Ce sont donc bien des terrains à nappes *multiples*.

La craie repose sur l'argile du Gault. Entre ces deux formations on trouve la craie à *Terebratulina gracilis* avec des couches très argileuses. Comme dans la craie à silex, les sources y sont puissantes, plusieurs font tourner un moulin à leur sortie.

La craie à belemnites pleines est plus argileuse encore et les parties calcaires sont assez limitées. Elles se trouvent du côté de l'Aisne. Elles fournissent à Nouvion de l'eau artésienne.

Nappe des sables du Gault. — Les sables du Gault sont à gros grains dans lesquels l'écoulement est facile. Ils sont assez limités et leurs eaux sont ou trop ferrugineuses ou trop salées.

Nappes dans les terrains primaires. — On trouve de l'eau dans les calcaires carbonifères de Lille, à la partie

supérieure des schistes siluriens ou dans les calcaires dolomitiques du frasnien.

Eaux du département de Meurthe-et-Moselle (d'après M. Imbeaux).

Trias. — ***Étage vosgien.*** — Le grès vosgien donne naissance à un pays de montagnes le plus généralement couvert de forêts. Il est surmonté du grès bigarré occupant plutôt les plateaux et n'est pas comme le premier recoupé de profondes vallées.

Le grès bigarré est riche en argile et n'a qu'une puissance de 30 mètres, le grès vosgien peut atteindre 300 mètres.

Le grès vosgien, très perméable, donne naissance à de très belles sources là où les vallées sont très profondes.

Dans le grès bigarré l'arrêt des eaux peut se faire ou bien sur un lit de schiste, dont la présence est très fréquente dans ces terrains, ou bien par la partie supérieure des grès vosgiens formée de poudingues agglomérés. A cause de sa richesse en argile, le grès bigarré est très peu perméable, l'importance de ses eaux souterraines est souvent très faible.

Dans les vallées il y a des débris de grès qui forment une nappe d'eau pouvant servir à alimenter les puits.

Étage conchylien. — La base de ce terrain est formée de marnes vertes ou rouge avec des lits de grès dolomitiques interposés, pouvant avoir une épaisseur de 40 à 60 mètres. Au-dessus viennent reposer des calcaires avec intercalation de marnes schisteuses et de petits lits d'argile. Dans la zone moyenne la couche schisteuse est si importante qu'elle forme un véritable terrain imperméable arrêtant les eaux. On trouve donc plusieurs niveaux d'eau et la circulation souterraine est complètement liée avec la présence, très souvent hétérogène, des lits argileux.

C'est la nappe retenue par la couche moyenne et schisteuse de l'étage conchylien qui est la plus importante. La nappe inférieure reposant sur le sous-étage marneux et la nappe supérieure arrêtée par une bande de schistes de 3 mètres sont bien moins importantes. Elles sont toutes trois utilisées pour l'alimentation par puits.

Étage Saliférien ou Keuper ou marnes irisées. — Cet étage est surtout marneux et par conséquent imperméable. Il est quelquefois surmonté d'alluvions anciennes très perméables qui peuvent contenir de l'eau.

Mais quand il n'y a pas d'alluvions cet étage est très pauvre en eau.

La partie inférieure de l'étage est formée d'argile verdâtre et schisteuse avec intercalation de dolomie et de gypse. A la base même de l'étage se trouvent des sables dolomitiques et argileux qui contiennent de l'eau très peu abondante parce que ces sables n'ont que des affleurements très limités.

La partie moyenne du Keuper est riche en sel et en gypse, avec intercalation de lits argileux. L'eau pénètre dans les couches gypseuses par les lignes de cassure et n'atteint guère les couches salées inférieures. Ces eaux sont très chargées en sels. La partie supérieure du Keuper est formée de dolomies sableuses, renfermant de l'eau relativement abondante, parce que ces terrains sont perméables. Elles reposent sur la couche imperméable du Keuper moyen.

On trouve de l'eau à la base du Keuper supérieur formé de grès et de calcaires dolomitiques. On n'en trouve plus à sa partie supérieure, formée d'argile schisteuse, que lorsque celle-ci est recouverte d'éléments détritiques.

Lias. — ***Étage Sinemurien.*** — On y rencontre à la base le grès infraliasique ou rhétien reposant sur la base imperméable du Keuper supérieur. Ces terrains perméables donnent naissance à des sources. Le grès rhétien formé à la base de grès fin siliceux surmonté d'un grès

plus grossier et à sa partie supérieure de dolomies grises, a une épaisseur faible. Comme ses affleurements sont de très faible puissance, les sources ne sont pas très abondantes. Toutefois en certains points, on trouve beaucoup d'eau dans ces grès, ainsi que le prouve la galerie filtrante de la Société Solvay à Varangeville.

Au-dessus des grès sont les marnes de Levallois, argile rouge ayant 4 à 15 mètres d'épaisseur. On trouve au-dessus le calcaire à gryphées arquées très perméable mais de trop faible puissance pour donner naissance à une nappe abondante. Ce calcaire peu uniforme est sillonné d'une intercalation de nombreux lits marneux.

Étage Liasien. — Cet étage est marneux avec, dans son intérieur, des bancs de grès et de calcaires de très faible épaisseur; aussi, est-il pauvre en eau. On ne trouve celle-ci que dans les intercalations grèseuses ou calcaires, ou bien lorsque les marnes sont surmontées d'alluvions des vallées. Quant aux sources qui naissent de ces terrains, elles sont très sujettes à tarir l'été et d'un débit très faible, comme on le comprend très bien. Les puits mêmes tarissent souvent l'été.

Étage Toarcien. — Cet étage est surtout marneux, plus ou moins schisteux avec intercalation de grès argileux. Sa partie supérieure est riche en fer disposé entre des couches argileuses plus ou moins épaisses et régulières. L'eau, contenue dans le terrain supérieur formé du calcaire bajocien, est arrêtée par une base imperméable dont le niveau varie de 20 mètres suivant l'importance des argiles surmontant les minerais de fer. En certains points le minerai de fer est baigné par l'eau, dans d'autres il est préservé. On ne trouve pas plus de niveau d'eau important dans le Toarcien que dans le Liasien.

Oolithe inférieure. — ***Étage Bajocien.*** — Cet étage, ayant une épaisseur moyenne de 60 mètres, est formé de calcaire très fissuré dans lequel sont souvent intercalés de petits lits marneux ($0^m,10$ à $0^m,40$ d'épaisseur) qui

sont, ainsi que nous l'avons déjà dit, insuffisants pour limiter les eaux en profondeur. On rencontre dans cet étage des eaux abondantes généralement très pures parce que ces terrains, peu cultivés et inhabités, sont couverts de nombreuses forêts. Les eaux provenant de ces calcaires ont comme origine les infiltrations pluviales ainsi que le débordement souterrain des eaux provenant de la nappe infrabathonienne, débordement s'opérant soit sous les éboulis des pentes, soit encore par l'intermédiaire d'une faille. On comprend alors l'importance des débits des sources de cet étage.

Étage Bathonien. — Bathonien inférieur. — La puissance moyenne de cet étage est d'environ 55 mètres, formée par une alternance de bancs marneux et de bancs calcaires. Dans le département de Meurthe-et-Moselle, M. Imbeaux distingue deux niveaux d'eau : le premier au contact des argiles à *ostrea acuminata*, le deuxième, dans les calcaires gris à grosses oolithes reposant sur les argiles de Gravelotte. Il existe ainsi deux lignes de sources abondantes ; mais une partie des eaux descend dans la couche inférieure bajocienne et les habitants du pays se plaignent de la pénurie d'eaux de sources en certains points.

Bathonien moyen. — On trouve dans ce sous-étage de petites nappes de très faible importance à la partie supérieure sur les caillasses à *Anabacia* et sur le banc marneux de la base du sous-étage ; mais la majorité des eaux circulant à travers les fissures du calcaire du Bathonien moyen, descendent jusque dans le Bajocien. Si donc au moyen de puits peu profonds on peut espérer trouver de l'eau, il ne faut guère en escompter de grosses quantités.

Bathonien supérieur et Callovien. — Dans le département de la Meurthe-et-Moselle le Bathonien supérieur est marneux, le Callovien est calcaire. On n'y trouve guère d'eau que dans ce dernier étage, dont les affleu-

rements ont une très faible importance, ou encore dans les alluvions qui surmontent souvent les marnes du Bathonien supérieur. On ne peut donc espérer obtenir d'eau en abondance dans ces terrains.

Oolithe moyenne. — ***Étage Oxfordien.*** — On divise cet étage en deux parties. A la base une couche argileuse imperméable dont la puissance est voisine de 100 mètres, et au-dessus le *terrain à chailles* formé de sables avec alternance de lits de marnes et de rognons calcaires. La nappe de ces terrains, retenue par les argiles de la base de l'étage, provient des infiltrations des pluies et des suintements de l'étage corallien supérieur. Ce terrain est très riche en eau, celle-ci ne s'échappant pas pour le profit des étages inférieurs.

Étage Corallien. — Ce terrain est très calcaire avec intercalation à sa partie supérieure de couches marneuses ayant 13 à 18 mètres d'épaisseur capables d'arrêter les eaux et de former plusieurs niveaux d'eau.

Oolithe supérieure. — ***Astartien.*** — Est formé d'un calcaire perméable surmontant une petite couche argileuse qui donne naissance à un petit niveau d'eau peu important par suite de la faible épaisseur de cette formation.

Kimmeridgien, Portlandien. — Ces couches n'existent pour ainsi dire plus dans le département de la Meurthe-et-Moselle. On les trouve dans la Meuse où une nappe très importante se forme au contact des calcaires du Barrois et de Kimmeridje-Clay.

Terrains Devoniens et carbonifères dans l'Ardenne.

Devonien. — ***Étage Gédinnien.*** — Cet étage est imperméable. Il est formé à la base par le poudingue de Fépin et l'arkose de Weismes, au-dessus par les schistes de Mondrepuits et les phyllades de Braux ; enfin à la partie

supérieure on rencontre les schistes rouges et les psammites de Fooz. On ne trouve donc dans ces terrains que des quantités d'eau insignifiantes provenant de l'altération des psammites à la surface ou du recouvrement de ces terrains par des éléments détritiques.

Coblentzien. — On divise cet étage en trois sous-étages. A la base les grès et grauwackes d'Anor, de Montigny et de Vireux, au-dessus les schistes rouges de Vireux et poudingues de Burnot, enfin à la partie supérieure les grauwackes d'Hierges. Tous ces terrains sont métamorphiques et par conséquent imperméables. On y trouve de l'eau à la partie supérieure, dans les endroits désagrégés comme dans les terrains granitiques. On ne peut donc espérer en obtenir de grandes quantités.

Eifélien. — A la base, on trouve les schistes à calcéoles qui sont imperméables, mais au-dessus reposent les calcaires de Couvin, fissurés et très perméables. Ces calcaires peuvent atteindre une épaisseur de 550 mètres environ, ils renferment alors à leur base une importante nappe d'eau variable avec la puissance de la formation.

Givetien. — Cet étage, entièrement calcaire, a une épaisseur plus régulière que celle de l'Eifélien. Ce terrain fissuré absorbe de grandes quantités d'eau. On y trouve même des cavernes et des grottes importantes. Ce sont des calcaires à nappes multiples. Ils sont parcourus par quelques failles qui drainent les eaux.

Frasnien. — A sa base se trouve le calcaire de Frasne et le marbre rouge de Flandre, terrain très fissuré ayant une épaisseur moyenne de 50 mètres environ, possédant dans son intérieur des nappes multiples plus ou moins localisées, et capables de donner de l'eau, mais à des profondeurs variables.

Au-dessus se trouvent les schistes imperméables de Matagne, par conséquent très pauvres en eau.

Famennien. — Au-dessus des schistes du Frasnien on rencontre les schistes de la Famenne et les psammites

du Condroz, à peu près imperméables. Ils sont surmontés par les calcaires d'Etrœungt, très fissurés, et donnant naissance à un niveau d'eau parfois très important.

Carbonifère. — ***Étage Dinantien ou Culm.*** — Cet étage comprend l'important niveau des calcaires carbonifères. Ceux-ci se sont fortement plissés ainsi que les terrains sous-jacents imperméables, et, étant très fissurés, on peut espérer rencontrer l'eau en abondance, surtout dans les parties synclinales. L'épaisseur de ces terrains peut aller jusqu'à 650 mètres.

Étage houiller. — On trouve à la base les schistes ampeliteux et au-dessus les psammites et schistes houillers. Nous savons comment les eaux circulent dans les psammites, ceux-ci sont en effet assez souvent imperméables. Il y a également des cas où l'étage houiller, quoique en grande partie imperméable, renferme des venues d'eau assez importantes à travers les psammites.

Les exemples que nous venons de présenter sont particuliers aux régions décrites. Il ne faudrait pas étendre les conclusions spéciales à chacune d'elles aux mêmes étages dans d'autres parties de France. En effet, dans le Nord le terrain est calcaire, il peut être marneux et imperméable dans le midi de la France. De sorte qu'un étage riche en eau au nord sera dépourvu de ressources aquifères au sud. La égende des cartes géologiques suffit souvent pour se rendre compte du *facies* des différents terrains.

Ainsi qu'on peut le voir par ces exemples, les points importants à connaître sont : l'étendue de l'affleurement des couches perméables, l'importance des sources qui en sortent, la perméabilité des différentes couches, l'épaisseur des couches imperméables, enfin les accidents géologiques, qui peuvent profiter ou nuire à ces nappes souterraines. Nous allons retrouver aux chapitres suivants ces différents renseignements.

DEUXIÈME PARTIE

HYDROLOGIE SPÉCIALE

I

DÉTERMINATION D'UN PÉRIMÈTRE D'ALIMENTATION. — MÉTHODE GÉOLOGIQUE ET COURBES DE NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES. — JALONNEMENTS DES EFFONDREMENTS.

Nous avons vu au chapitre précédent l'importance qu'il y a de connaître le gisement géologique qui doit fournir de l'eau. Suivant sa nature, son épaisseur, etc., les quantités d'eau obtenues ou qu'on peut obtenir varient énormément. D'un autre côté, quand on veut prendre une source il est utile de savoir d'où elle vient, de façon à se préserver des contaminations voisines, voire même pour prendre les mesures nécessaires afin de capter l'eau la plus pure ou la moins minéralisée d'une source s'alimentant à plusieurs nappes.

Il est alors indispensable de déterminer le périmètre d'alimentation des eaux qu'on veut capter.

Nous commencerons par les terrains perméables en petit dans lesquels on peut assimiler le niveau d'eau à une nappe unique.

Les quelques notions de géologie et les exemples de niveau d'eau donnés au chapitre VII (1re partie) suffisent pour permettre de comprendre et même d'apprendre à estimer tout au moins l'étendue du gisement sur lequel

repose le périmètre d'alimentation d'une source. En cherchant à évaluer ce dernier on ne doit pas perdre de vue la diversité de la circulation souterraine et passer en revue toutes les hypothèses possibles. C'est pourquoi nous n'avons cessé d'insister sur l'influence des failles ou des éboulis qui peuvent faire descendre les eaux d'un terrain dans un autre, ou encore les faire remonter, tous événements géologiques qui ont ici une grande importance.

On trouvera un bel exemple de la détermination d'un périmètre d'alimentation par la méthode géologique dans le travail de M. Schardt sur l'origine des sources vauclusiennes de la Doux et de la Noiraigue (1).

Terrains perméables en petit. — La quantité d'eau qu'une source ou un puits peut donner dépend beaucoup de l'étendue du bassin d'alimentation.

L'examen géologique d'une région permet de déterminer dans un certain nombre de cas, comme nous l'avons vu, le périmètre d'alimentation d'une couche sableuse reposant sur une couche imperméable. Toute la partie bordée par l'affleurement de la couche imperméable représente l'étendue du périmètre d'alimentation des sources qui viennent y prendre naissance.

Si on ne veut pas épuiser les réserves aquifères des différentes couches, les puits qu'on sera amené à y creuser ne pourront guère être capables de fournir, d'une façon continue, que la quantité d'eau maxima tombée dans une année sur tout le périmètre d'alimentation. L'examen géologique répondra déjà à une première question, celle de savoir quelle quantité maxima d'eau on peut espérer retirer d'une couche sableuse déterminée.

La figure 45 représente un mamelon de sables de Fontainebleau reposant sur l'argile verte (cet exemple est tiré de la carte géologique, feuille de Paris). C'est sur cette butte de sable que se trouve installée la ville

(1) M. Schardt, *Bulletin Société belge de géologie*, 1905, p. 554 à 569, M

de Dammartin. La surface totale de cet affleurement de sables de Fontainebleau étant de 270 hectares, en admettant les chiffres de l'abbé Paramelle, cette formation est capable de donner au maximum 4 litres d'eau à la seconde et par an.

Le périmètre des fontaines qui sont à la base de ce mamelon est ici très bien délimité.

Le problème est plus délicat quand le mamelon augmente d'étendue. Dans ce cas, toutes les eaux généralement ne se dirigent pas vers le même versant. Elles se répartissent de chaque côté du mamelon et la position

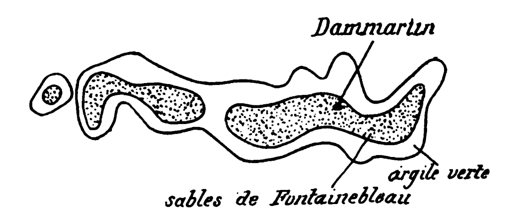


Fig. 45. — Butte de sable de Fontainebleau, reposant sur un sol imperméable.

de la ligne de faîte, définie dans la première partie, dépendra beaucoup, comme M. Pouchet l'a montré, de l'inclinaison de la couche imperméable.

Comme le but qu'on se propose, avons-nous vu, quand on veut s'alimenter en eau, est de ne pas tarir la réserve d'eau sur laquelle on peut compter, et comme dans les nappes à deux versants, une partie seulement des eaux de l'ensemble de l'affleurement se dirige vers les points où on désire faire une prise d'eau, la quantité maxima sur laquelle on peut compter devra être calculée, par prudence, en ne tenant compte que de la limite du périmètre d'alimentation occupant le versant envisagé.

La véritable méthode, pour déterminer le périmètre d'alimentation d'un versant et la circulation de l'eau dans

les sables a été indiquée et surtout employée par d'Andrimont.

Supposons en effet (fig. 46) une vallée qui reçoit, de chaque côté, des eaux souterraines. Pour déterminer la surface de la nappe dans ces terrains, il suffit de construire les puits 1, 2, 3, 4, 5, etc. jusqu'au moment où on trouve de l'eau.

En réunissant ces hauteurs d'eau par une ligne hypothétique, on a l'allure de la nappe. D'autre part, sur un

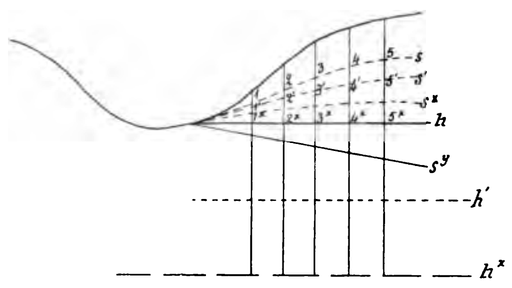


Fig. 46. — Détermination, d'après d'Andrimont, de la circulation souterraine à différentes profondeurs.

vaste périmètre si on réunit tous les puits ayant même niveau par une ligne, on obtient une courbe de niveaux piézométriques. Si au lieu de s'arrêter en 1, 2, 3, etc., on continue ces puits jusqu'à une surface h' et que par un moyen quelconque que nous apprendrons à connaître, chaque puits ait ses parois imperméables jusqu'au niveau de h', l'eau occupera dans chacun des puits les positions 1′ 2′ 3′ 4′ 5′, etc.

Si à une distance h^x la nappe est stagnante, en descendant les puits jusqu'au niveau h^x on trouvera un autre niveau, cette fois horizontal, parce que nous avons vu précédemment qu'un tel niveau n'admet aucun mouvement. Enfin l'horizontale peut se changer en une ligne inclinée en sens inverse des paraboloïdes, s, s', etc., de

telle sorte que les eaux qu'on pourra prendre à cette profondeur viendront non plus de la partie droite de notre figure, mais de la partie gauche, l'écoulement ne pouvant jamais se faire que d'un point haut vers un point bas.

C'est de cette façon que d'Andrimont a pu montrer que dans les dunes il y avait à la partie supérieure une certaine circulation d'eau, et à la partie inférieure une circulation contraire.

Quand à la base d'un massif se trouve une eau ayant

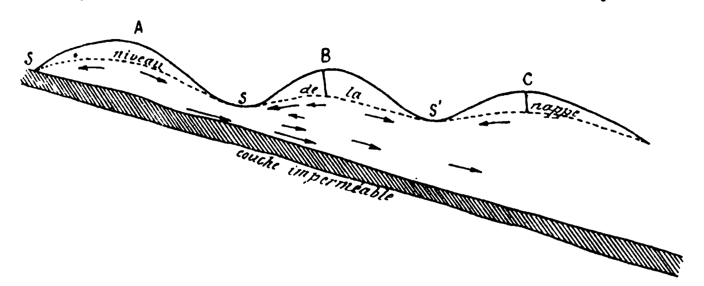


Fig. 47. — Circulation générale sous un affleurement géologique de vaste étendue.

un mouvement inverse de celui de la surface, le périmètre d'alimentation de ce massif est beaucoup plus étendu que celui auquel on se serait attendu en tenant compte seulement de la surface de l'eau dans les puits peu profonds.

Ce cas se retrouve surtout quand on a affaire à de vastes versants comme celui représenté sur la figure 47. Chacune des crêtes A, B, C de ces périmètres forme la limite du partage des eaux superficielles de chaque versant, mais en profondeur la circulation est souvent différente.

La détermination d'un périmètre d'alimentation sur un terrain sablonneux d'une certaine étendue est un problème relativement difficile et coûteux, si le gisement est puissant.

Toutefois dans les sables, les limons, les graviers, les forages sont relativement peu coûteux. Quand on connaît l'inclinaison de la couche imperméable, il suffit de creuser trois forages alignés parallèlement à cette direction et de mesurer le niveau de l'eau quand ces forages arrivent à différentes hauteurs. En réunissant chaque fois, pour les forages de même profondeur, le niveau d'eau par une ligne, on peut dresser des courbes s, s', — s^x, comme il est indiqué à la figure 46.

Supposons que le massif B (fig. 47) reçoive de l'eau enant en profondeur du massif A. Si, pour ce dernier, on connaît le débit des sources qui y prennent naissance, dans le cas où ce débit est bien inférieur au débit calculé d'après la hauteur d'eau tombée, et le coefficient de 1/4 ou de 1/5 de profit pour les nappes, on peut se rendre compte du volume perdu par le massif A qui passe sous le massif B. Ce débit est à ajouter à celui calculé pour le massif B seul, de façon à estimer le débit probable. Au point de vue de l'évaluation de la source S de la quantité d'eau disponible, la détermination du périmètre d'alimentation est donc essentiellement utile.

Nous trouverons, dans la détermination du périmètre dans les terrains fissurés, des moyens d'investigation qui peuvent également rendre service dans les terrains perméables en petit.

Jusqu'à présent nous n'avons envisagé qu'un terrain bien homogène ; c'est pour ainsi dire l'exception. Les sables, avons-nous vu, présentent par places des parties argileuses qui les rendent peu perméables. Pour les sables de Cuise, de l'éocène inférieur, nous avons cité l'exemple d'Irreville (1). Or l'étude des courbes des niveaux piézométriques sera très utile dans ce cas.

(1) « Avec M. Guillerd, nous avons pu nous rendre compte de ces différences dans la circulation des sables au moyen de pompages. A Irreville, on avait constaté qu'après les pluies le niveau de certains puits augmentait très sensiblement de hauteur. Ce fait tenait à l'arrivée, en assez grande pro-

Supposons qu'ayant un grand nombre de puits creusés dans un massif déterminé, on puisse réunir entre eux ceux dont le niveau de l'eau est à la même altitude. La figure 48 représente le résultat de cette opération.

Suivant AB la nappe s'abaisse plus rapidement. Si on

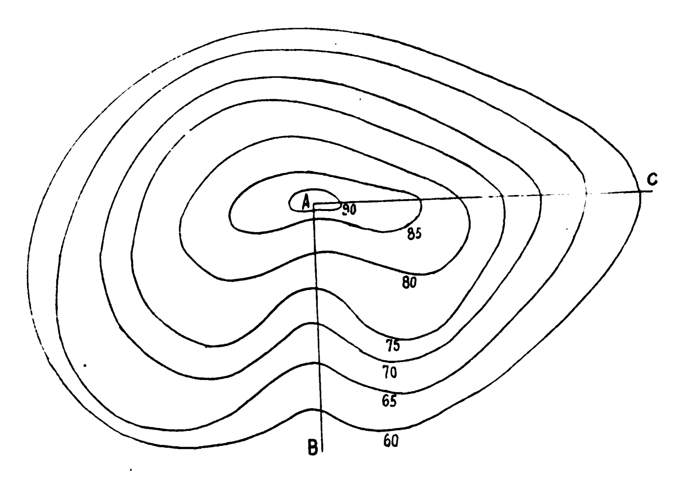


Fig. 48. — Courbes de niveaux piézométriques.

fait des coupes verticales passant par AB et AC, on trouve les formes indiquées sur la figure 49. Dans la

portion, d'eau filtrant à travers la maçonnerie non étanche des puits. Dans d'autres, le niveau variait très peu. Des expériences de pompage dans l'intérieur des puits de chacune de ces catégories ont démontré que tous les puits dont le niveau montait très sensiblement après les pluies étaient ceux qui s'asséchaient le plus vite et qui, une fois l'épuisement arrêté, se remplissaient le plus lentement. Au contraire, ceux qui s'épuisaient lentement, se remplissaient très vite; après les pluies, ces derniers ne variaient pas de niveau. Les puits qui, par épuisement, donnaient le plus d'eau, étaient groupés autour d'une zone facile à limiter. Ayant eu l'occasion de proposer un forage donnant beaucoup d'eau, nous avons indiqué son emplacement dans la zone que nous avions ainsi trouvée et nous avons pu constater, en effet, que ce forage une fois terminé donnait une grande quantité d'eau. Nous aurons l'occasion de revenir plus tard sur ce cas.

coupe AC, l'abaissement du niveau de l'eau est moins rapide et il est facile de voir que tout se passe comme si, suivant AC, il y avait un obstacle à l'écoulement.

L'écoulement suivant AB est donc le plus facile, c'est celui qui rencontre le moins d'obstacle. Le périmètre d'alimentation des puits creusés vers B comprend une partie de l'espace situé au sud de la ligne CA, prolongée à gauche de la figure parce que, suivant cette ligne CA, il y a également un écoulement.

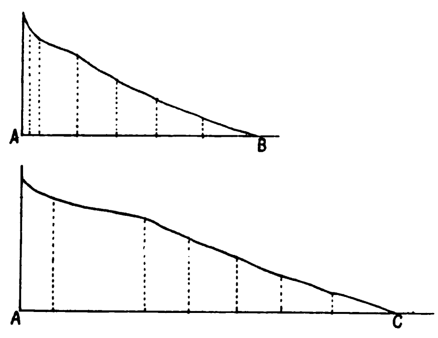


Fig. 49. — Coupes perpendiculaires suivant AB et AC.

Pour avoir un puits donnant une grande quantité d'eau dans ces terrains sableux, il faut se placer dans les environs de la ligne AB, principalement en son centre. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce sujet par la suite.

Terrains perméables en grand. — La non homogénéité qu'on trouve déjà dans les sables se retrouve plus accentuée encore dans les terrains fissurés. La détermination du périmètre au moyen de la géologie est loin d'indiquer la quantité d'eau dont on pourra disposer, car, malgré que l'on ait démontré qu'il y a anastomose des différents canaux qui alimentent les sources, il y a lieu de compter avec le débit de ces fissures.

Ainsi, en pompant dans les puits d'un terrain fissuré, on arrive quelquefois à le tarir complètement en quelques minutes. Le pompage terminé, il faudra attendre un certain temps pour que le niveau revienne à son point initial. Au contraire, on n'arrive pas à tarir certains puits, même très voisins des précédents, parce que la diaclase qui les alimente donne un débit suffisant.

La géologie indique le gisement géologique où on trouve l'eau, son étendue et sa puissance. Elle prévoit la couche imperméable sur laquelle repose le terrain perméable aquifère ainsi que son affleurement. Ce sont les seules limites qu'elle peut déterminer, elles sont trop vastes quand il s'agit d'un gisement géologique puissant comme la craie.

Dans les terrains fissurés, le périmètre d'alimentation d'une source n'est pas toujours situé au voisinage de l'émergence. C'est quelquefois une vaste région, située à plusieurs kilomètres en amont, qui est drainée, en un certain point, par une longue et importante diaclase conduisant les eaux à la source sans, pour ainsi dire, recevoir d'autres eaux sur son long parcours. Ce dispositif ne peut être prévu par la géologie.

Les courbes de niveaux piézométriques n'indiquent que le sens général de l'écoulement des eaux souterraines. Les puits ne sont pas assez nombreux, et les forages trop chers, pour dresser de telles courbes permettant de saisir les particularités si nombreuses de l'écoulement des eaux de ces terrains.

Les puits n'intéressent que la nappe phréatique, tandis qu'il faudrait pouvoir, comme dans la figure 47, connaître également la circulation en profondeur, souvent différente de celle de la surface. De ce que la géologie et les courbes de niveaux piézométriques sont insuffisantes pour déterminer un périmètre d'alimentation, ceci ne veut pas dire que ces méthodes ne sont pas nécessaires.

Chercher à déterminer le périmètre d'alimentation au

moyen de la géologie et au moyen des surfaces de niveaux piézométriques est une opération préliminaire primordiale qu'on ne saurait trop conseiller, à la condition cependant de ne pas donner à ces déterminations des conclusions exagérées qu'elles n'ont pas.

Le besoin s'impose ensuite de les compléter par les méthodes scientifiques dont nous allons parler.

Jalonnements des effondrements. — Nous avons parlé précédemment des gouffres et effondrements qu'on rencontre dans les terrains calcaires. Les cavernes ayant été creusées sous l'action d'un courant souterrain, les effondrements qui en résultent permettent de prévoir qu'il y a en ces points une importante diaclase.

Comme ces effondrements sont souvent très nombreux et s'échelonnent les uns les autres, on peut espérer connaître le périmètre d'alimentation de ce courant en remontant vers l'amont leur ligne de jalonnement.

Malheureusement, ces effondrements sont souvent placés sans ordre bien apparent, comme on peut s'en rendre compte aux sources de l'Avre (Voy. carte, p. 142); il y a donc impossibilité de suivre pratiquement une fissure par ce moyen, et on n'est pas toujours assuré de rencontrer un courant souterrain sous un effondrement.

Par suite des changements qui se produisent dans l'hydrologie souterraine, dont nous avons déjà parlé plus haut, une caverne a pu être en effet abandonnée par les eaux, et son toit ne s'effondrer que beaucoup plus tard.

Toutefois on connaît des exemples de tels courants rencontrés sous des effondrements; nous citerons en Normandie le courant trouvé par M. Ferray dans la forêt d'Évreux près de Gaudreville. Nous rappellerons qu'il y a des courants non sillonnés d'effondrements, comme celui de la caverne de Trépail (Marne). Cette méthode ne peut servir que là où les effondrements sont peu nombreux et placés les uns à la suite des autres, c'est-à-dire dans des cas exceptionnels.

D'après l'abbé Paramelle, le jalonnement des effondrements suivrait les directions des vallées, d'où la possibilité de trouver de l'eau dans toutes les vallées, le courant souterrain suivant une vallée parallèle au courant superficiel. Cette opinion est très souvent exagérée.

II

DÉTERMINATION D'UN PÉRIMÈTRE D'ALIMENTATION. — EMPLOI DES MATIÈRES SOLUBLES ET EN SUSPENSION. — RÉSULTATS HYDROLOGIQUES.

Expériences par les matières solubles. — La circulation des eaux dans le sous-sol peut être étudiée en incorporant, en un point d'un périmètre, une certaine quantité d'une substance soluble, facilement discernable et dosable au besoin. En s'unissant à l'eau, les substances incorporées individualisent les molécules, et, si ces dernières reparaissent à une ou plusieurs sources, le corps soluble employé y ressortira également. Entre le point où l'expérience est tentée et les sources intéressées, on peut trouver des puits qui reçoivent la substance employée, indiquant ainsi qu'ils sont, sinon sur la direction totale du courant, tout au moins sur une direction partielle.

L'importance de ces expériences est double : non seulement elles permettent de se rendre compte de la direction d'un courant comme nous le verrons, d'en soupçonner l'existence en certains points, ce qui est utile pour creuser d'autres puits, c'est-à-dire pour avoir de l'eau, mais encore elles ont pour but de faire connaître la qualité des eaux qu'on a à sa disposition. Dans la pratique agricole, on peut avoir à faire souvent des expériences de ce genre, et comme nulle part, si ce n'est en partie dans le gros volume de MM. Debauve et Imbeaux sur les distributions

d'eau, on n'en trouve les détails, nous traiterons cette partie d'une façon assez détaillée.

Prenons le schéma d'une circulation souterraine dans un massif fissuré (fig. 50) (1). Deux sources S et S' reçoivent des eaux par les diaclases que nous avons figurées en traits interrompus. En A la diaclase alimentant la source S est supposée percée par un bétoire la faisant communiquer avec la diaclase alimentant S'. Nous voulons connaître le chemin parcouru par une molécule d'eau s'infiltrant dans le sol au point B. Cette molécule

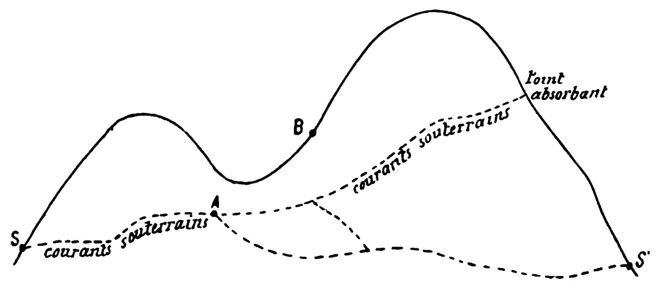


Fig. 50. — Schéma d'une circulation souterraine dans les terrains perméables en grand.

doit être reconnue pendant son parcours, tout au moins à sa sortie du sol.

On doit donc la différencier soit en la combinant avec une substance facile à déceler, soit en l'associant à certains corps très légers et très fins qui peuvent passer, comme elle, à travers les très fines fissures du sol.

(1) M. Fournier a montré qu'un même canal souterrain pouvait alimenter deux sources situées dans deux bassins hydrographiques différents :

Ainsi, l'entonnoir de Nancray communique d'une part avec la source d'Arcier, d'autre part avec celle de Grand-Vaire, sur la rive gauche du Doubs.

Celui de Creux-sous-Roche communique d'une part avec la source d'Arcier au nord et avec la source du Maine, dans la vallée de la Loue, au sud. C'est le dispositif que représente la figure 50.

Dans la pratique on préfère souvent employer les substances dissoutes parce qu'on n'est jamais certain du degré de finesse des fissures du sol.

La substance employée à l'état de dissolution doit satisfaire à un certain nombre de conditions.

La première est d'être très facilement soluble dans l'eau ;

La deuxième est de ne pas s'altérer dans le parcours souterrain ;

La troisième est d'être facilement décelable ;

La quatrième est d'être peu coûteuse ;

La cinquième est d'être inoffensive aux organismes qui peuvent l'absorber.

Ces multiples conditions éliminent tous les composés colorés sauf la fuchsine acide et la fluorescéine.

Parmi les corps minéraux solubles c'est le sel marin ou le chlorure de calcium qui sont le plus employés.

Quelle que soit la substance employée, la méthode générale suivante préside à toutes ces expériences d'hydrologie souterraine.

La substance est versée en B avec une quantité d'eau suffisante pour la faire parvenir à la diaclase qui l'acheminera vers les sources. De la quantité d'eau dont on dispose en B dépend souvent la réussite de l'expérience. On l'évalue très arbitrairement ainsi : si en B se trouve un puits dans lequel on verse l'eau renfermant en dissolution la substance qui sert à la différencier, la quantité minima d'eau à employer est représentée par une colonne d'eau ayant comme diamètre celui du puits et comme hauteur la profondeur de la nappe comptée à partir du sol. C'est un *desiderata* qu'on doit s'efforcer d'atteindre. Dans les figures 51 et 52, on voit que pour chasser l'eau en question dans le courant souterrain il faut déplacer toute l'eau qui se trouve dans le puits entre le niveau AB et la diaclase. Plus la diaclase est profonde ou plus la diaclase est éloignée, plus il faudra d'eau.

Ces expériences demandent donc une certaine quantité d'eau pour être effectuées, elles échouent quelquefois

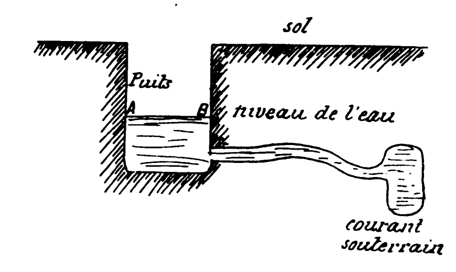


Fig. 51. — Alimentation d'un puits en terrain fissuré (1er exemple).

parce que cette condition n'est pas toujours réalisée.

Dans notre schéma de la figure 50, le bétoire A est capable d'absorber un certain volume d'eau. Si le bétoire souterrain A est capable d'absorber, au moment de l'expérience, plus que le débit du courant souterrain et de l'eau engouffrée en B, la source S' seule recevra la substance employée.

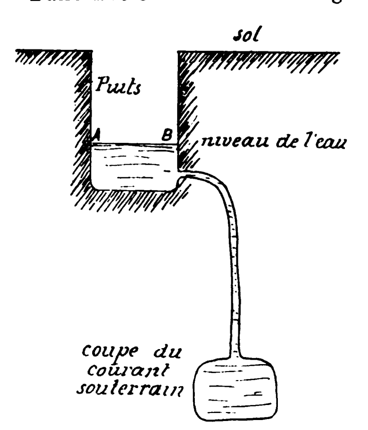


Fig. 52. — *b*. Alimentation d'un puits en terrain fissuré (2e exemple).

Qu'il arrive une saison humide, le débit des diaclases augmentera, l'eau absorbée en A sera inférieure au débit de la diaclase, et une partie des eaux ira en S.

Une expérience tentée à l'époque de sécheresse, mais en envoyant en B un volume d'eau suffisant, pourra nous montrer que S peut, à certains moments, recevoir des eaux de B.

Une grande quantité d'eau est encore nécessaire pour éviter une trop grande dilution de la substance employée.

Supposons par exemple qu'on dispose en B d'un débit de 1 litre d'eau à la seconde pour chasser la substance dans la nappe jusqu'à sa rencontre avec un courant souterrain dont le débit est supposé égal à 1000 litres à la seconde. Quand la substance arrivera dans la diaclase elle se diluera dans les proportions de 1 litre pour 1000 litres, c'est-à-dire du 1/1000.

Mais si on peut disposer d'un débit de 10 litres, la dilution ne sera que de $\frac{10}{1000}$, soit seulement de 1 p. 100. La proportion de substance augmentera dans le second cas plus que dans le premier, et la sensibilité de l'expérience sera augmentée.

Quand on dispose d'un débit peu important, il faut alors augmenter la dose de substance employée. Avant toute expérience, on fait quelques hypothèses pour évaluer les doses à employer.

Supposons que le point B soit sur un plateau. Sur la carte, on mesure la distance à vol d'oiseau de ce point à la vallée la plus proche, soit b, ainsi que les distances BS, BS', etc., c'est-à-dire aux différentes sources susceptibles de recevoir les eaux de cet endroit. Enfin on additionne tous les débits de ces sources.

Soit l la distance du point examiné à la source la plus lointaine (en centimètres), soit Δ le débit de toutes ces sources (en centimètres cubes), soit a le débit à la seconde de l'eau dont on dispose au point B (débit en centimètres cubes), l'expérience apprend que la quantité de substance à employer est déterminée par la for-

mule suivante : $A = K\Delta l$; A est évalué en gramme (1).

K étant un coefficient qui varie avec la substance employée. Ce coefficient est de $\frac{2.5}{10^9}$ pour la fluorescéine et de $\frac{5}{10^8}$ pour a fuchsine et de $\frac{2.5}{10^6}$ pour le sel marin.

On évalue la quantité minima d'eau à envoyer dans la nappe pour ces expériences en se basant sur ce fait que la substance doit être chassée jusqu'à la diaclase, laquelle se trouve très généralement sous le thalweg de la vallée (simple hypothèse pour se guider).

On estime qu'il faut autant de mètres cubes d'eau qu'il y a de mètres de distance. Dans bien des cas, cependant, on ne dispose pas d'un cube aussi considérable. Si la vallée est à 500 mètres par exemple, il faudrait 500 mètres cubes. A raison de 4 mètres cubes d'eau à l'heure, il faudra plus de cent heures, c'est-à-dire quatre jours. On se contente malheureusement de beaucoup moins d'eau, mais il arrive très souvent également que dans ces conditions les résultats sont négatifs. On doit alors être très circonspect sur les conclusions à en tirer.

Quand on opère dans une vallée, on cherche à avoir un débit suffisant pour envoyer dans la nappe de 12 à 30 mètres cubes d'eau.

La substance, une fois introduite dans la nappe, doit être suivie jusqu'à son arrivée aux sources.

Or un puits peut être sur le parcours du courant, ou ne reçoit de l'eau que par une anastomose de la diaclase principale, comme il est indiqué dans les figures 51 et 52.

Si la diaclase passe en travers du puits, la substance y arrive naturellement et en faisant des prélèvements à intervalles réguliers, on peut connaître l'heure de son apparition.

(1) Si le volume d'eau dont on dispose en B est moindre que 5 litres à la seconde, A doit être multiplé par $\frac{5000}{a}$.

Au contraire, si la diaclase ne passe que sur le côté, la coloration n'apparaîtra guère qu'en pompant suffisamment d'eau pour obtenir un échantillon de l'eau passant à ce moment dans la diaclase voisine. On comprend en effet, par la figure 51, qu'il faut pomper d'autant plus d'eau que la diaclase est plus éloignée du puits. Malheureusement, il faudrait dans bien des cas au-dessus de chaque puits un manège ou une machine à vapeur pour pomper assez d'eau, ce qui est très rare. On se contente le plus souvent de pomper chaque fois 30 à 50 litres d'eau.

Cette quantité est insuffisante. En effet, ce pompage a aspiré une quantité équivalente d'eau de la diaclase renfermant la substance employée et qu'il s'agit de déceler. Mais cette eau va venir seulement après plusieurs pompages se diluer dans la masse d'eau du puits, soit peut-être 5 à 10 mètres cubes. Il se produit ainsi une dilution du $\frac{1}{100}$, qui marque souvent la coloration. Quant à l'heure de son apparition dans la diaclase, ce raisonnement montre qu'on ne peut pas l'évaluer avec exactitude.

Comme on sait rarement si la diaclase recoupe verticalement le puits ou si elle passe de côté, il est indispensable chaque fois de pomper dans les puits en expérience.

La substance peut passer dans le puits soit le jour, soit la nuit. Les prises doivent être faites pendant toute la durée de l'expérience.

Ce que nous venons de dire pour les puits doit être répété en ce qui concerne les sources. Une source n'est autre chose qu'un puits dans lequel un écoulement continue est assuré.

On se contente donc de prélever à la source, à des heures régulières, une quantité d'eau suffisante pour rechercher la substance qui sert à l'expérience.

Fluorescéine. — La fluorescéine est la phtaléine de résorcine. A l'état pur, elle est insoluble dans l'eau, mais elle est soluble dans l'alcool et également dans les

alcalis avec lesquels elle forme des sels. Elle est roug en solution concentrée, mais possède un dichroïsme intéressant. Elle est verte par transparence, et sa fluorescence apparaît mieux quand on la dilue.

Le jet de la substance se fait de la façon suivante :

Si au point B (fig. 50) se trouve une rivière qui se perd, on se contente de jeter la substance, dissoute dans l'eau, un peu en amont de la perte et d'une façon régulière de manière que le jet soit terminé au bout d'une heure.

Quand en B on a affaire à un puits, on jette immédiatement la substance dans celui-ci et on la chasse en suite au moyen du courant d'eau dont on dispose.

Si on n'a pas à côté de soi un courant d'eau facilement détournable pour l'envoyer dans le puits en question, on peut amener l'eau au moyen de tonneaux ou de barils. M. Le Couppey a utilisé dans l'Yonne et à la Dhuys les barils qu'il avait trouvés chez les habitants. Dans les pays vignobles, cela se trouve facilement; dans les autres la mobilisation d'un tel matériel est plus malaisée. Nous avons quelquefois utilisé avec succès le tonneau traîné par des chevaux; dans d'autres cas, nous nous servions d'une pompe à incendie quand l'eau était proche. Lorsque les circonstances obligent à faire des réserves d'eau pour chasser la fluorescéine, celles-ci doivent être faites avant l'expérience, parce que pendant sa réalisation on ne doit pas pomper dans les puits voisins du lieu d'absorption, de façon à ne pas changer le régime souterrain.

Dans le sol, la fluorescéine ne se dépose pas et ne se combine avec aucun élément. Elle peut être bue sans inconvénient et est très facile à reconnaître. Elle répond donc bien aux *desiderata* indiqués plus haut.

Son pouvoir colorant est très considérable et on peut reconnaître très facilement la fluorescéine à l'œil nu à la dose de $\frac{1}{10\,000\,000}$, c'est-à-dire à la dose de 1 gramme dans 10 mètres cubes d'eau.

Au moyen d'un instrument très simple, appelé fluorescope, inventé par M. Trillat, on peut aller jusqu'à la dose du $\frac{1}{10\,000\,000\,000}$ pour les eaux très claires et peu chargées en substances minérales. La limite de un milliardième est plus sûrement atteinte.

Le fluorescope est un tube en cristal, long d'un mètre environ, et fermé à sa partie inférieure par un bouchon noirci au moyen de plombagine, son diamètre est de 2 centimètres.

On commence par se procurer plusieurs de ces tubes, dans lesquels la même eau doit avoir la même coloration. Il faut donc les essayer au préalable et éliminer ceux dans lesquels la couleur de l'eau est différente. Le déchet est souvent de 50 p. 100. En prenant deux tubes remplis de la même eau, prise à des heures différentes, si l'une contient de la fluorescéine, par comparaison, on aperçoit celle-ci avec un reflet verdâtre.

Dès le commencement de l'expérience, on prélève nu échantillon de l'eau de chaque source et de chaque puits avant qu'elle ne renferme une trace de matière colorante. Cette première prise servira de témoin. On l'introduira à chaque observation dans un tube et on comparera sa coloration à celle d'un deuxième tube renfermant la suite successive des divers échantillons d'eau prélevés dans le puits ou la source pendant tout le cours de l'expérience.

Lorsqu'il y a de la fluorescéine on aperçoit la couleur verdâtre avec des reflets de fluorescence.

Cette opération nécessite une certaine habitude qui s'acquiert plus ou moins vite. Il faut également se méfier des petits changements qui surviennent dans la coloration de l'eau des puits dans le cours d'une journée (1).

(1) Nous avons pu nous fixer sur ce point, dans la région de l'Avre, en examinant avec M. Guillerd, au cours d'une période d'un mois, plus de 5 000 échantillons d'eau se rapportant à une dizaine de puits, prélevés douze fois par vingt-quatre heures.

Il arrive quelquefois que par suite d'infiltrations les eaux deviennent verdâtres. Cette coloration peut être confondue, lorsqu'elle est faible, avec la fluorescéine parce qu'aux faibles doses la fluorescence se voit assez difficilement. Cette coloration est temporaire dans certains puits, elle peut exister également dans quelques sources émergeant en terrains tourbeux, et au moment des grandes eaux. Quand les eaux sont troubles il faut les filtrer jusqu'à parfaite clarification, sans cela la fluorescéine se trouve dissimulée.

Enfin, quand la coloration est peu intense, on peut la renforcer par l'addition d'ammoniaque. L'introduction de cet alcali produit une précipitation, par suite de la réaction suivante :

$$(CO^3)^2CaH^2 + AzH^3 = CO^3(AzH^4)^2 + CO^3Ca.$$

Le carbonate de chaux CO^3Ca est insoluble ou très peu soluble et se précipite. Cette précipitation n'est pas immédiate et exige de cinq à dix minutes pour être complète. L'eau trouble est filtrée très soigneusement avant d'être examinée au fluorescope.

L'emploi de l'ammoniaque est absolument nécessaire quand on a des eaux très riches en acide carbonique, parce que la fluorescéine est décolorée en partie sous l'influence de cet acide. L'addition d'ammoniaque lui redonne sa coloration primitive.

On a prétendu que dans le sol, la coloration de la fluorescéine disparaissait, du moins en partie.

Cette opinion semble être une erreur. M. Fournier a vu de la fluorescéine réapparaître après plusieurs mois de séjour dans le sol, nous-même avons constaté que des tubes de fluorescéine très diluée ne se sont pas altérés au bout de deux ans en tubes scellés. Enfin nous avons décelé dans un puits du Breuil [commune de Verneuil (Eure)] de la fluorescéine qu'on y avait jetée cinq ans auparavant. Ce puits est creusé dans un sol calcaire (craie turonienne).

Mais ce qui ne fait aucun doute c'est l'altération de la fluorescéine très diluée, sous l'influence de la lumière. Aussi est-il prudent, quand on ne peut faire l'examen de suite, de laisser les flacons de prise à l'obscurité.

On ne doit jamais craindre d'employer trop de cette substance tout à fait inoffensive pour les organismes. On a prétendu qu'en colorant trop les puits ou les sources, on effrayait les habitants. Cette crainte est mal fondée et les expériences ont montré que les habitants d'une région voient apparaître cette coloration avec curiosité, souvent même avec un certain intérêt.

Il suffit seulement de leur montrer l'innocuité de cette substance en buvant devant eux l'eau teintée. Devant cette preuve irréfutable, ils reprennent rapidement confiance.

On ne peut être arrêté, quant à la dose à employer, que par des considérations budgétaires.

Mais il vaut toujours mieux en employer plus que moins.

Quand on emploie la fluorescéine pour déceler des contaminations d'un puits dans les fosses d'aisances ou les fumiers et non pour déterminer le périmètre d'alimentation, on se sert d'une dose plus grande de substance, parce que, dans ce cas, une grande quantité de fluorescéine est décolorée.

En effet notre formule $A = \Delta l \times \frac{2,5}{10^9} \times \frac{5000}{a}$ pour le cas d'un puits situé à 10 mètres d'une fosse d'aisances dont les infiltrations contaminent le puits, si on considère que l'infiltration est de 1^{c3} à la seconde et si $\Delta = 1\,l$ à la seconde par hypothèse.

On trouve $A = 12^{gr},5$.

Cette quantité serait tout à fait insuffisante.

Dans ce cas, le coefficient de notre formule devient : $K = \frac{2,5}{10^8}$ et même quelquefois $K = \frac{2,5}{10^7}$.

Pour le reste de l'expérience, on emploie la même technique que pour déterminer un périmètre d'alimentation, comme on le verra par la suite.

Fuchsine acide. — La fuchsine acide est bien moins sensible que la fluorescéine. A la dose de $\frac{1}{5000000}$ elle devient invisible. Elle est donc environ dix fois moins sensible que la fluorescéine, aussi, doit-on en employer une dose dix fois plus forte.

La fuchsine s'observe dans une éprouvette de 100 centimètres cubes, avec également un échantillon témoin placé dans une éprouvette semblable. Il faut additionner l'eau d'acide acétique, parce que cette substance colorante se décolore dans l'eau, surtout dans les eaux calcaires.

La fuchsine est très soluble dans l'eau, mais sa faible sensibilité lui fait préférer la fluorescéine qui est relativement moins chère.

Toutefois quand on veut tenter dans une région deux expériences consécutives, on peut employer simultanément les deux substances. C'est principalement pour déterminer les contaminations par fosses d'aisances que Trillat préconise son emploi.

Sel marin. — Le sel marin est facilement décelable dans l'eau au moyen du nitrate d'argent et du chromate de potasse. C'est un corps absolument inoffensif pouvant être employé sans aucun inconvénient. Il est très soluble dans l'eau.

Quand on fait une expérience il faut pouvoir compter sur une augmentation d'au moins 5 milligrammes de chlore par litre dans l'eau des sources. Or 5 milligrammes par litre représentent $\frac{5}{1000000} = \frac{1}{200000}$, c'est-à-dire une dilution mille fois moins sensible que la fluorescéine.

Il coûte aussi 100 fois moins, de telle sorte que le prix d'une expérience avec le sel marin revient à 10 fois celui d'une expérience avec la fluorescéine.

Si le sel marin est facilement décelable, l'opération est toutefois plus compliquée qu'avec le fluorescope. Aussi cette substance est-elle peu employée. La première expérience avec le sel marin a été faite par le professeur Knopp aux pertes du Danube. On cite encore Hoegler qui, par ce moyen, a démontré en 1893 la communication des fontaines de Lausen avec le ruisseau de Fulerbach et avec les eaux d'irrigation de la prairie voisine.

Nous verrons par la suite que cette substance peut être employée dans certaines circonstances de préférence aux matières colorantes.

Substances en suspension. — On a employé dans beaucoup de cas le son ou la balle d'avoine, mais à travers les fines fissures ces corps ne peuvent passer et sont arrêtés.

On a employé également l'amidon cuit qu'on retrouve assez facilement au microscope et à la lumière polarisé, ainsi que par l'iode qui colore ce corps en bleu.

M. Miquel a proposé l'emploi du *Saccharomyces cerevisiæ* et du *Mycoderma aceti*.

On a encore employé certains microbes faciles à reconnaître comme le *B. violaceus* (Fränkel et Piefke), *B. pyocyaneus*, *micrococcus prodigiosus*, substances servant surtout à déterminer la qualité d'une eau et rarement un périmètre d'alimentation, nous nous en occuperons dans un autre chapitre.

Autres corps dissous. — On a employé quelques corps odorants facilement reconnaissables à l'odorat. Nordlinger a employé le sapiol (dilution limite $\frac{1}{1\,000\,000}$), le pétrole.

L'incendie de l'usine Pernod qui eut lieu le 11 avril 1901 a permis de démontrer la communication entre le Doubs et la Loue. L'absinthe s'écoula dans un puisard voisin du Doubs et réapparut quarante-huit heures après dans la source la Loue. On la reconnut à son odeur.

Quelle que soit la substance employée pour déterminer un périmètre d'alimentation, voici comment on opère :

Supposons (fig. 53) un gisement géologique avec à sa base une série de sources (S, S', S'', S_1, S'_1, S_1'',) s'il est impossible de déterminer le débit de ces deux groupes de sources on trace une ligne hypothétique XX' divisant en deux parties égales le périmètre de ces sources et en A,

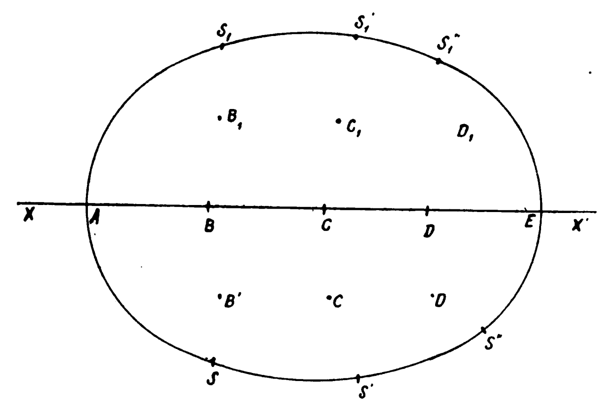


Fig. 53. — De l'étude systématique d'un périmètre d'alimentation au moyen des matières colorantes.[1]

B, C, D, E on fait des expériences avec les substances précédemment indiquées, puis en B', C', D', B_1, C_1, D_1. De cette façon on détermine les parties du périmètre qui communiquent avec les différents sources ou puits.

Ces expériences sont suffisamment coûteuses et, pour ne pas les multiplier outre mesure, on doit généralement, avant de les entreprendre, avoir déblayé le terrain par d'autres moyens que nous allons aborder dans les paragraphes suivants.

En effet, les conclusions hydrologiques tirées des expériences faites jusqu'ici avec les substances dissoutes vont nous permettre d'imaginer d'autres méthodes, moins

certaines que par l'emploi des substances dissoutes, mais permettant de tracer un grossier périmètre d'alimentation avant d'entreprendre les coûteuses expériences au moyen de la fluorescéine. Ces résultats sont présentés sous forme de principes.

Premier principe. — Les expériences avec la fluorescéine montrent que les diaclases peuvent alimenter des sources situées dans deux zones émissives séparées (1) par une zone absorbante.

Si on prend par exemple la région de la Vanne, on trouve une série de sources sur la rive gauche de cette rivière. Ce sont des sources de thalweg qui sortent de la craie sénonienne. Or sur la rive droite de cette rivière on trouve bien une nappe qui incline vers la vallée de la Vanne, dont une partie vient circuler à travers les alluvions de la rivière, et sur la rive gauche une nappe dont l'inclinaison est également vers la vallée. D'après l'abaissement de la nappe phréatique il semblerait que les eaux de la rive droite de la Vanne ne peuvent venir ressortir à la source Noë, par exemple, située sur la rive gauche.

Or une expérience faite la première fois par M. Albert Lévy et répétée par nous a bien montré que la fluorescéine jetée à Villiers-Louis, au lavoir du village, est apparue à la source Noë (fig. 54), franchissant la vallée de la Vanne par-dessus la rivière. Nous avons également vu dans la vallée du Betz, affluent du Loing, le cas de fluorescéine allant ressortir à des sources après avoir passé alternativement sous des zones émissives et absorbantes.

La figure 55 montre la coupe schématique de cette vallée. La fluorescéine, jetée dans le bétoire des Charpentiers, a réapparu aux sources des Bignons Mirabeau.

(1) On appelle zone émissive celle au milieu de laquelle se trouvent des sources.

	Vitesse à l'heure.
Source Irroulet.................	166 mètres.
— Murailles................	205 —
— Chateau.................	175 —
— de Chevannes...........	92 —
— des Chanivelles.........	83 —

L'intensité de la coloration allait en diminuant jusqu'aux Chanivelles. La diaclase qui alimente la

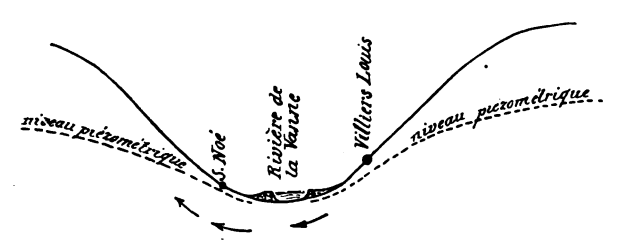


Fig. 54. — Coupe à travers la vallée de la Vanne.

source des Bignons Mirabeau se prolonge donc beaucoup plus loin que la première zone émissive (celle des sources des Bignons Mirabeau).

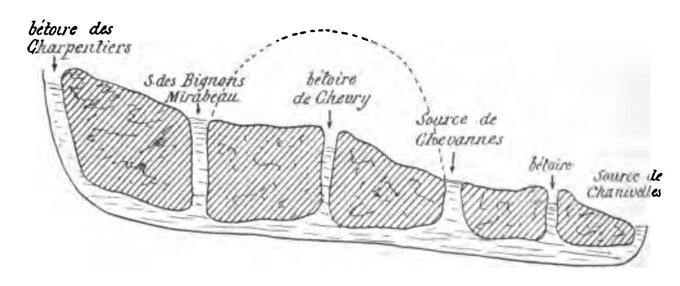


Fig. 55. — Coupe longitudinale de la vallée du Betz (affluent du Loing).

Que par la pensée entre la source des Bignons Mirabeau et celle de Chevannes, on suppose, représenté en pointillé,

un massif d'une certaine importance, les eaux tombant sur celui-ci se répartiront entre les sources des Bignons Mirabeau et celles de Chevannes, mais ces dernières sont encore alimentées par le bétoire des Charpentiers.

Ces sources sortent également de la craie sénonienne, mais, comme dans tout terrain calcaire, on retrouve les mêmes dispositifs de circulation souterraine, il y a lieu de ne pas s'étonner de trouver des dispositifs semblables dans des terrains autres que la craie.

Deuxième principe. — Sur un périmètre d'alimentation, les zones qui alimentent les différentes sources se répar-

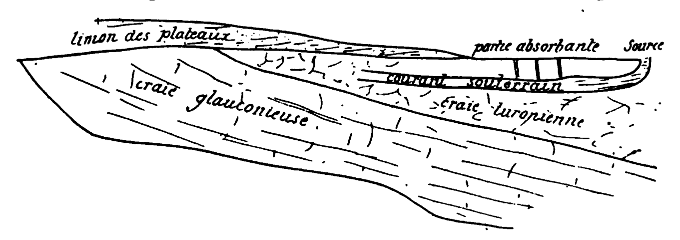


Fig. 56. — Coupe géologique de la région de l'Avre.

tissent très généralement d'une façon bien régulière sans s'enchevêtrer.

La démonstration de ce deuxième principe est extrêmement importante, parce qu'elle permettra de restreindre, à quelques expériences seulement avec le fluorescéine, la détermination d'un périmètre d'alimentation.

Le terrain classique pour faire cette démonstration est celui des sources de l'Avre, sur lesquelles nos études ont porté pendant trois années consécutives.

Les sources de l'Avre sortent de la craie turonienne. Ce sont également des sources de thalweg (fig. 56). Dans la partie amont les couches géologiques se relèvent et on trouve la craie glauconieuse très peu perméable, recouverte, en partie du moins, par le limon des plateaux assez argileux.

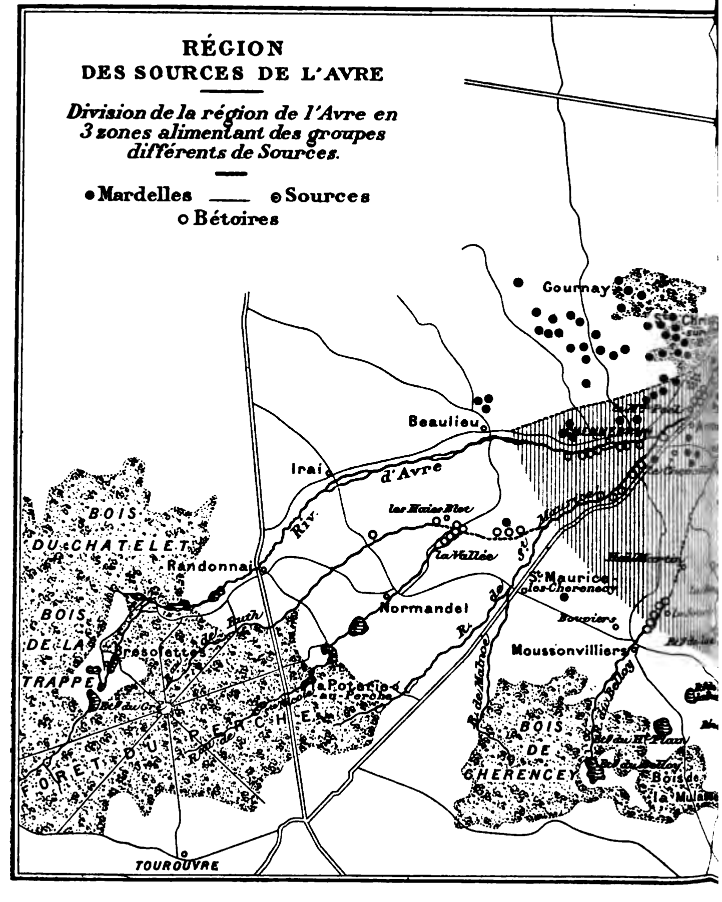
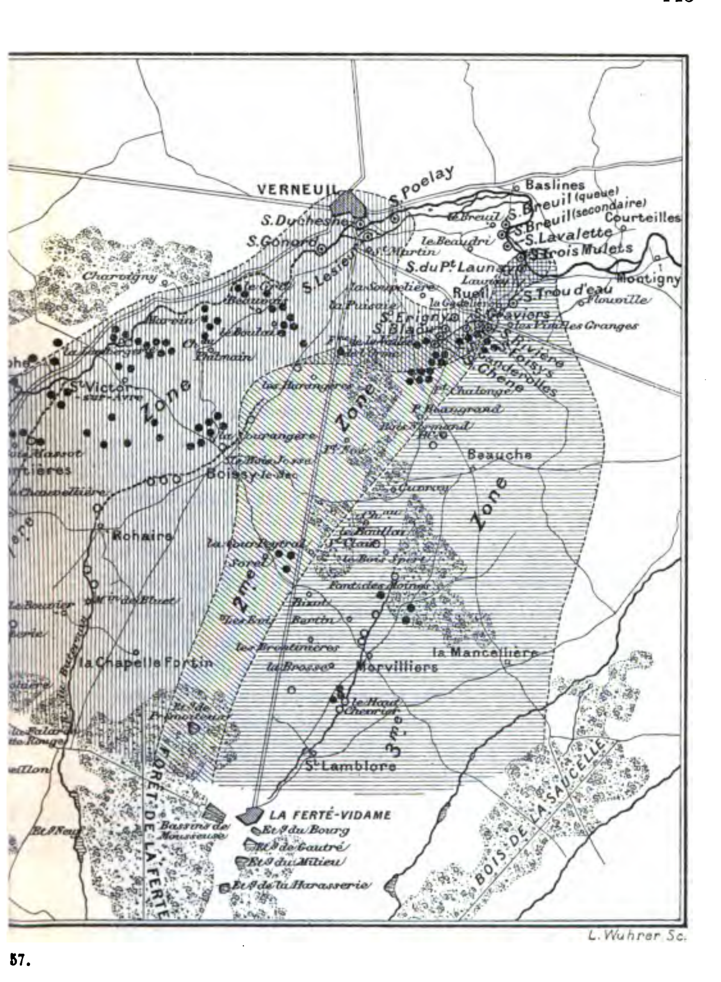

RÉGION
DES SOURCES DE L'AVRE
Division de la région de l'Avre en 3 zones alimentant des groupes différents de Sources.
Mardelles
Sources
Bétoires
Gournay
Beaulieu
Irai
Riv. d'Avre
la Vallée
Randonnai
St Maurice-les-Chereney
Normandel
Bouviers
Moussonvilliers
BOIS DU CHATELET
BOIS DE LA TRAPPE
Bresolettes
la Poterie-au-Perche
FORET DU PERCHE
BOIS DE CHERENCEY
TOUROUVRE

Fig. 5


VERNEUIL
S. Poelay
Baslines
S. Breuil (queue)
S. Breuil (secondaire)
Courteilles
S. Duchesne
S. Gonord
S. Lavalette
S. Trois Mulets
le Beaudri
St Martin
S. du Pt Launay
Montigny
Charoigny
S. Lesieur
la Soupelière
Rueil
S. Trou d'eau
S. Erigny
S. Blaou
Graviers
les Vieilles Granges
St Victor sur Avre
Zone
Boissy le Sec
Beauche
Rohaire
la Chapelle Fortin
Morvilliers
la Mancellière
St Lamblore
2me
3me
LA FERTÉ-VIDAME
Et. du Bourg
Et. de Gautré
Et. du Milieu
Et. de la Harasserie
Bassins de Mousseuse
FORÊT DE LA FERTÉ
BOIS DE LA SAUCELLE
L. Wuhrer Sc.

57.

Dans toute cette partie peu perméable les eaux de ruissellement sont très abondantes. Les ruisseaux y prenant naissance ne sont pas issus de sources mais d'étangs qui récoltent les eaux et forment des réservoirs superficiels, tandis que les sources s'alimentent à des réservoirs souterrains.

Tant que les eaux de ces ruisseaux circulent à travers la craie glauconieuse ou le limon des plateaux elles sont très peu absorbées par le sol (1), mais aussitôt que le limon fait défaut l'absorption commence (d'après M. Janet).

Or à la base de cette zone absorbante se trouve une série de sources que la Ville de Paris a captées pour la plupart. On peut les grouper en deux parties : 1° celle de Rueil prise par la Ville de Paris, 2° celle de Verneuil. Le vaste périmètre à l'amont est sillonné par une série de petits ruisseaux assez bien répartis qui permettent un assez grand nombre d'expériences à la fluorescéine (fig. 57, p. 142 et 143).

En allant de gauche à droite il y a d'abord l'Avre, la rivière principale, puis le Ruth, le Saint-Nicole, le ru de Saint-Maurice, celui de Moussonvilliers, le ru de Belloy, le ru du Buternay, le ru de Sorel, le ru du Lamblore.

Sur chacune des pertes de ces ruisseaux des expériences ont été faites. L'engouffrement des eaux se produit soit par des lits absorbants, soit par des bétoires.

L'Avre peut se perdre depuis Chennebrun jusqu'à La Lambergerie et Verneuil.

Les expériences, faites à Chennebrun et à la Lambergerie, colorèrent les sources de Verneuil et celles de Rueil à l'exception de la source du Breuil et de la Valette. A noter en passant que les bétoires de la Lambergerie forment sources par les années humides. Ce sont des bétoires sources qui jouent l'un ou l'autre rôle selon que le niveau piézométrique de la nappe est plus

(1) On rencontre quelques petites sources dans la craie glauconieuse, dont les eaux circulent dans la partie supérieure du sol formée de craie remaniée.

bas ou plus haut que le sol. C'est un bétoire dans le premier cas, une source dans le second cas.

La rivière de Saint-Maurice se perd dans les environs de la Blottière. Plusieurs effondrements ont été recomblés, mais presque tous les ans il s'en forme d'autres.

Une expérience faite au bétoire d'Astel a montré que toutes les sources de Rueil et de Verneuil étaient colorées.

Entre l'Avre et cette rivière on a pu faire deux expériences, l'une sur le Ruth qui a toujours donné des résultats négatifs quoique l'absorption fût très nette, l'autre, au Sainte-Nicole, qui a donné des résultats positifs aux sources de Verneuil et de Rueil, sauf toujours à celle du Breuil. Lors de ces expériences, ce sont les sources Érigny et Foisys qui furent les plus colorées des sources de Rueil. Celles de Verneuil étaient colorées comme celle d'Érigny. Or l'intensité de la coloration mesure la facilité de la communication avec les points expérimentés, d'où on peut conclure que cette partie du périmètre voisin de l'Avre communique surtout avec les sources d'Érigny et Foisys et avec les sources de Verneuil.

En se reportant plus à droite, une expérience fut faite en aval de Moussonvilliers, aux bétoires du Souci. La fluorescéine fut retrouvée aux différentes sources de Verneuil et de Rueil, sauf à celle du Breuil. Les sources les plus colorées furent celles du Nouvet.

Le ruisseau de la Gohière, qui prend naissance dans les étangs de la Gohière, vient se perdre en aval des Demaines et arrive jusqu'à Bois-Massot. Une expérience tentée en ce point fut négative. Il y a lieu de se demander si du Ruth ne part pas une diaclase très profonde passant par Bois-Massot qui aurait son débouché dans une région bien plus en aval de Rueil.

Le ruisseau de Buternay, qui vient de la forêt de la Ferté-Vidame, commence à disparaître dans le sol au moment de quitter la Chapelle-Fortin. Une expérience

tentée à Rohaire a permis de colorer toutes les sources de Rueil mais surtout le groupe du Nouvet. Les sources de Verneuil et du Breuil *furent indemmes.*

Une deuxième expérience tentée à Boissy-le-Sec ne permit de colorer que le groupe du Nouvet et de Rivière à l'exclusion des autres sources.

Une troisième expérience tentée au bétoire du Vaux-Renard donna le même résultat, ainsi qu'en opérant sur le ru de Sorel au bétoire de Sorel. Sur le ru du Lamblore, au bétoire du Haut-Chevrier, et au Boullay Saint-Clair, les eaux réapparaissent aux sources Rivière Trou d'eau, Launay, Trois-Mulets, et à certaines époques à Foisys.

De l'exposé que nous venons de faire, nous voyons que le périmètre des sources de l'Avre (Rueil et Verneuil) peut se diviser en trois zones alimentant chacune des groupes de sources assez nettement déterminées. La zone de droite (1[re] zone) atteint les sources basses. La zone du milieu (2[e] zone) alimente surtout la zone des sources du milieu; enfin la zone de gauche, troisième zone, la plus importante, correspond bien avec toutes les sources mais principalement avec les sources les plus à gauche, sources Érigny et Foisys.

Cette régularité dans la disposition des zones se retrouve encore dans d'autres régions crayeuses, à la Vanne, par exemple.

Dans les terrains du Jurassique, M. Le Couppey, étudiant les sources de l'Yonne et de la Cure en amont de Cravant (1), a fait plusieurs expériences à la fluorescéine qui confirment également ce que nous avons trouvé aux sources de l'Avre. Ainsi :

L'expérience faite à Fontenay-sous-Fouronnes colore toutes les sources de l'Yonne sauf celle du lavoir de Trucy.

L'expérience de Courson colore les sources de Grosse-Pierre et du Crisenon.

(1) Voir carte d'État-Major, feuille d'Auxerre.

A l'expérience de Petit-Banny les sources attientes pour celles du Bief de Saint-Romain et des Trois-Moulins.

Enfin à l'expérience de Vellery les sources atteintes sont celles de la précédente expérience, excepté Saint-Romain, plus celle de Gulène (fig. 58).

A la Dhuys, dans le calcaire de Champigny (terrain tertiaire), la répartition régulière du périmètre des eaux se retrouve encore. Toute la zone de gauche du périmètre alimente surtout la source de Champy et un peu celle de Pargny-sur-Dhuys. Au centre, M. Le Couppey colora la source de Pargny, et l'expérience faite aux bétoires de Rougefosse donna un résultat négatif; mais, sur la partie droite du périmètre, la source de Pargny ne fut pas colorée; la conduite de 15 millimètres, amenant des eaux d'une émergence située à droite de la source de Pargny, le fut.

Devant ces résultats obtenus dans des terrains aussi différents comme âge, mais tous calcaires, nous pouvons admettre que ce deuxième principe est très général.

Troisième principe. — Les diaclases qui se coupent en projection horizontale dans un même gisement géologique s'anastomosent entre elles (1).

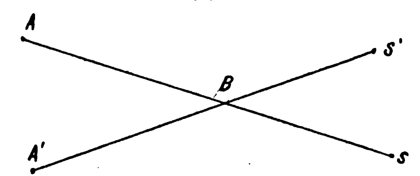


Fig. 58. — Schéma représentant deux diaclases se coupant en projection horizontale.

Les expériences à la fluorescéine ont montré cet autre principe, très utile à connaître quand on veut déterminer

(1) Nous admettons une exception à ce principe, quand une des diaclases est bien plus profonde que l'autre. On voit très bien dans ce cas comment l'eau de la diaclase supérieure peut gagner la diaclase inférieure, tandis que la réciproque est plus difficile à s'imaginer. Les résultats que nous avous obtenus jusqu'ici ne nous ont pas encore permis de constater cette exception très vraisemblable.

le périmètre d'alimentation d'une source ou même d'un puits. Une *figure schématique* (fig. 59) le fera mieux comprendre. Supposons une expérience faite en A et ayant démontré que les eaux partant de ce point se dirigent vers la source S. Par la pensée nous supposerons une diaclase AS.

Faisons une expérience en A'. Si les eaux partant de A atteignent la source S', elles atteindront également la source S, parce que la diaclase AS' coupe en B la diaclase AS.

Déjà M. Martel, dans ses explorations spéléologiques, a trouvé la communication de deux diaclases sises à deux niveaux différents.

Les travaux de MM. Schardt et Fournier ont montré également que très souvent il y a anastomose des fissures qui se coupent.

Cependant M. Martel (1) cite des exemples de veine d'eau courante profonde passant, sans aucune communication, sous leur ancien lit. Ce n'est pas une objection au précédent principe, parce que la partie supérieure du sol n'est pas de même horizon géologique que le sous-sol.

Dans la caverne de Goudenans-les-Montby le courant souterrain se bifurque en deux branches, dont l'une repasse en dessous de la galerie principale, et sans aucune relation entre elles au point de croisement. Ces deux branches cependant ne sont pas indépendantes à proprement parler, du moment qu'elles sont issues du même ourant. Cet exemple montre qu'il ne faut donc pas prendre au sens exclusif l'énoncé de notre troisième principe, et la relation entre deux diaclases qui se coupent peut se faire soit à l'aval, soit à l'amont de B; ce qu'il importe, c'est qu'elle se fasse en un point donné.

Ce principe est presque une conséquence du deuxième principe qui n'admet pas l'enchevêtrement des zones. Il

(1). E. A. Martel, le Sol et l'Eau. — Brouardel, *Traité d'hygiène*, (p. 106), fasc. 2.

convient de faire remarquer, avant de passer à sa démonstration, que ce troisième principe n'est plus applicable si, dans le terrain sédimentaire, on peut considérer deux zones distinctes en profondeur qui, bien que formées par des calcaires, sont séparées par une couche imperméable, comme le *town* de la craie du nord. Mais, dans tous les autres terrains sédimentaires, nous n'avons pas, *jusqu'ici*, trouvé d'exception.

Ainsi reprenons la figure 57 relative aux sources de l'Avre. Les résultats des expériences nombreuses que

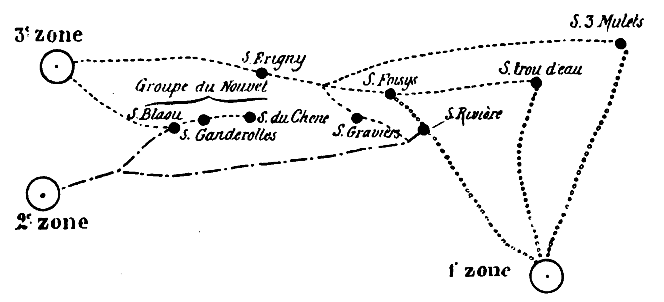


Fig. 59. — Schéma de la circulation souterraine des eaux alimentant les sources de l'Avre.

nous avons faites dans toute la région sont susceptibles d'être synthétisés ; les diaclases qui alimentent les différentes sources peuvent être représentées par les lignes en traits plus ou moins interrompus ou par des points. L'examen de cette figure montre que les diaclases qui ne se coupent pas sont sans communication entre elles (fig. 59).

Aux sources du Loing et du Lunain la situation est identique (fig. 60).

Une expérience faite un peu à l'est d'Égreville dans un bétoire dit des Blains, a coloré les sources de Lorrez-le-Bocage, de Paley et celle de Villemer et non celles de Saint-Thomas et du Coignet captées par la Ville de Paris.

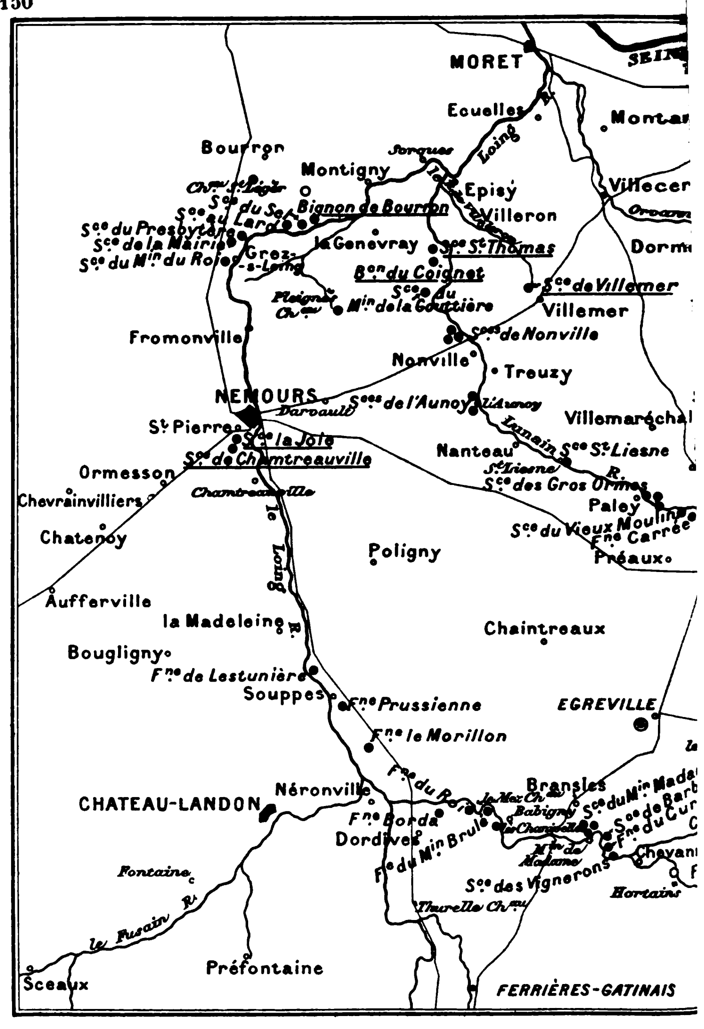
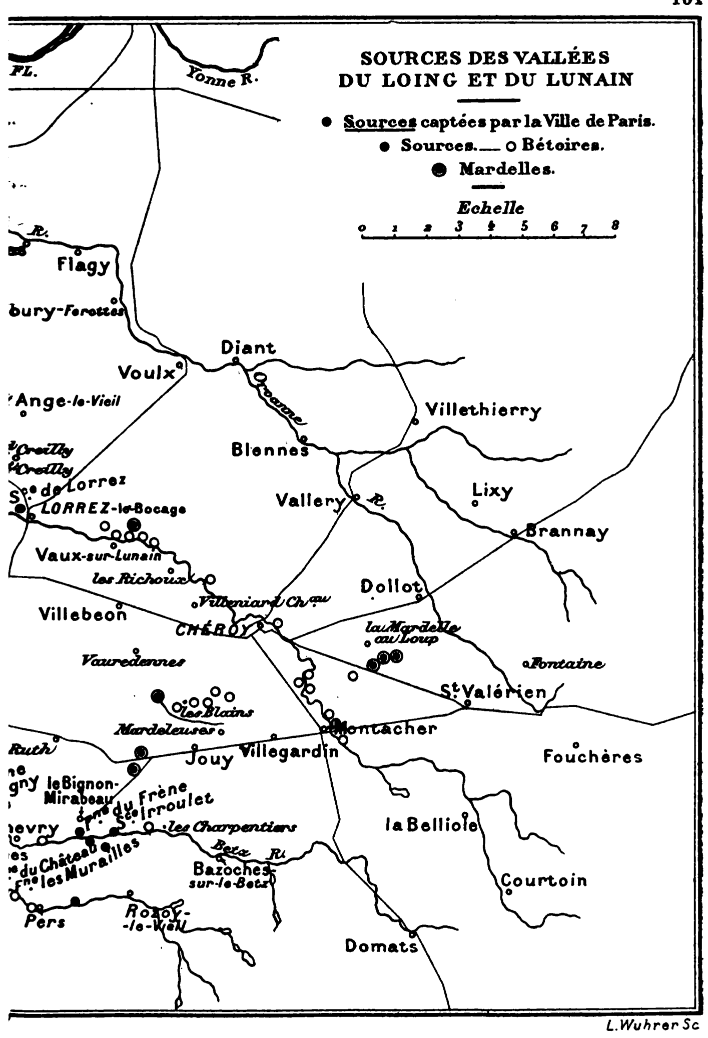


Fig. 60. — Sources des val



…ées du Loing et du Lunain.

Une expérience faite dans la vallée du Lunain, en amont de Vaux-sur-Lunain, ne pouvait encore pas colorer les sources de Saint-Thomas et du Coignet, car sans cela la diaclase conductrice aurait coupé celle venant des Blains, dont les eaux auraient dû colorer ces sources, si notre troisième principe est vrai. Et en effet, l'expérience faite à Vaux-sur-Lunain a coloré les mêmes sources (de Lorrez, Paley et Villemer).

Les sources Saint-Thomas et du Coignet, captées par la Ville de Paris dans la vallée du Lunain, n'ayant pas été colorées conformément à notre troisième principe, l'expérience faite aux Blains suffisait pour limiter le périmètre d'alimentation de ces sources à l'ouest de la ligne rejoignant le bétoire des Blains, les sources de Paley et celle de Villemer. Nous verrons par la suite qu'il en est bien ainsi (1).

A la source de la Dhuys et à celles de l'Yonne et de la Vanne on trouve également la vérification de ce principe. Celui-ci va nous permettre de montrer qu'on n'a pas besoin de faire un grand nombre d'expériences pour l'étude d'un périmètre.

Reprenant le schéma d'une étude (fig. 53) d'un périmètre d'alimentation, si nous désirons connaître le périmètre de la source S′ par exemple, nous commencerons d'abord par faire une expérience en C′. Si en C′ les eaux se dirigent vers la source S nous n'aurons pas besoin de faire l'expérience en B′, nous pourrons de suite tenter l'expérience en C. Si de C on colore non seulement

(1) Il est évident que les expériences faites dans cet ordre d'idées sont encore en nombre trop restreint pour se permettre d'affirmer qu'il n'en est pas quelquefois autrement. Mais nous pensons que ce principe peut s'appliquer dans la majorité des cas, vu que nous n'avons pas encore trouvé d'exceptions à la règle énoncée. D'autre part, si dans la figure 58 la diaclase AS est la plus profonde, la température de la source S′ sera la plus élevée. Pour appliquer ce troisième principe, il sera utile, à notre avis, de commencer par la diaclase A′S′, c'est-à-dire du côté de la source la plus chaude, car, d'après le dispositif supposé, ses eaux pourront, aux environs de B, se déverser naturellement dans la diaclase AS.

S′ mais encore S″, si O est sur le périmètre de S′ ce point sera également sur celui de S″. En résumé, on devra commencer par les points les plus certainement sur le périmètre et s'étendre ensuite progressivement à droite et à gauche. On s'arrête aussitôt que l'on tombe sur un point qui ne communique plus avec la source en question.

Mais dans toutes ces expériences, nous le rappelons, il faut se mettre dans de bonnes conditions pour leur réussite, et ne pas hésiter à employer une dose de matières suffisante pour être à peu près certain du résultat positif ou négatif.

Quand on est très rapproché d'une source on peut, suivant la profondeur à laquelle les eaux souterraines parviennent, obtenir des résultats différents. Ainsi à Chaintréauville près de Nemours (Seine-et-Marne) nous avons fait un forage à 70 mètres de la source de Chaintréauville captée par la Ville de Paris (près de la rivière du Loing).

Une expérience faite à 7 mètres de profondeur a coloré la source Pauly et non celle captée par la Ville de Paris; l'expérience faite en envoyant de la matière colorante dans le puisard, à 15 mètres de profondeur, a non seulement coloré d'une façon encore plus intense la source Pauly, mais également, plus faiblement il est vrai, la source de Chaintréauville. A 25 mètres de profondeur, et grâce à la surcharge, la matière colorante a dû arriver plus facilement à la diaclase qui alimente la source de Chaintréauville et passe à quelque distance de là, tandis qu'à 7 mètres seulement de profondeur elle est trop profonde et trop éloignée. Mais ce résultat n'indique nullement qu'une des diaclases alimentant la source de Chaintréauville est à côté du forage. Au contraire, dans une expérience faite plus près de cette source, la fluorescéine est arrivée presque sans surcharge d'eau. On était bien tombé très près de la diaclase alimentant au moins une émergence.

Malgré cette remarque, le régime souterrain au

voisinage de Chaintréauville est très nettement et régulièrement réparti.

Quatrième principe. — Dans un périmètre déterminé les fuites sont possibles quand les eaux ont trouvé au milieu des terrains imperméables une partie perméable qui leur a fourni un passage. Ces eaux sont alors perdues pour la couche géologique au profit d'une autre couche sous-jacente. Une faille, par exemple, ou bien encore un affleurement incomplet, permet aux eaux, comme nous l'avons vu, de gagner des terrains inférieurs. Un travail récent de M. Martel (1) appuie notre quatrième principe.

Pour le moment nous signalerons comme exemple probable d'une fuite dans la partie imperméable l'expérience faite par M. Le Couppey de Laforest dans les bois de Rougefosse qui donna, malgré les conditions d'une bonne réussite, un résultat négatif pour la source captée et même pour les autres sources du périmètre. Les marnes à *pholadomya ludensis* peuvent présenter en ce point une faiblesse et une partie des eaux arrivent à gagner la nappe plus inférieure des sables de Beauchamps. L'importance d'une telle constatation est très grande parce qu'elle montre qu'il existe aux environs de ce point un drainage d'eau important qu'on peut utiliser quand on veut prendre de l'eau. Ces problèmes intéressent particulièrement l'agriculture, qui doit chercher par tous les moyens possibles à empêcher l'enfouissement en profondeur des eaux de surface, de façon à les utiliser le mieux possible pour ses besoins.

Vitesse des eaux souterraines. — Avant de passer au cinquième principe, il est utile d'indiquer quelles sont les vitesses de propagation d'une eau à travers les fissures d'un terrain quand on se place dans les conditions d'une expérience avec la fluorescéine. Il ne faut pas croire, en effet, qu'en faisant une surcharge d'eau en un point d'un périmètre on ne modifie pas le régime. Le but qu'on

(1) Martel, C. R., 1906, déjà cité.

se propose étant d'arriver à connaître si les molécules d'eau peuvent arriver à une source déterminée, on crée forcément des conditions artificielles d'écoulement qui obligent ces eaux d'arriver le plus tôt possible aux principales diaclases qui alimentent la source. En temps ordinaire et sans aucune surcharge, les molécules d'eau marcheront souvent avec des vitesses bien moindres.

Ceci dit, et toutes réserves faites sur l'interprétation à donner aux vitesses absolues trouvées dans les expériences, il est intéressant de savoir combien de temps une eau peut mettre, dans un terrain déterminé, pour accomplir le chemin de 1 kilomètre mesuré à vol d'oiseau. Plus les fissures seront larges, plus facilement les eaux s'achemineront et arriveront rapidement aux résurgences. La pente des diaclases et des couches intervient pour accélérer le mouvement des eaux souterraines.

Les vitesses trouvées dans les expériences varient depuis 20 mètres à l'heure, c'est-à-dire le kilomètre en cinquante heures, jusqu'à 400 mètres à l'heure. Quand, dans des expériences de ce genre, la fluorescéine ou toute autre substance n'est pas parvenue après que la vitesse calculée à vol d'oiseau sera inférieure de 10 mètres à l'heure, on peut en conclure, avec quelques réserves cependant, que l'eau a pris une autre direction. Dans les alluvions la vitesse est souvent moindre (1 à 5 mètres par jour).

Pour lever les doutes il faut, avec dix fois plus de substance, recommencer l'expérience, et, resserrant encore les conditions d'exécution de l'expérience, chercher à augmenter les moyens d'absorption de l'eau. Si encore, dans ces conditions, l'expérience est négative, on en conclura trois choses : ou bien il y a une fuite dans la partie imperméable de la nappe, ou bien, si le gisement géologique est étendu, l'eau a pris une direction tout autre de celle prévue et est allée ressortir à d'autres sources non observées, ou bien enfin qu'il y a dans le sous-sol des lacs souterrains formant des réservoirs très

importants qui diluent trop la matière employée. L'étude de ces problèmes ne peut être résolue avec l'aide unique des substances dissoutes; et nous montrerons par la suite les moyens dont on dispose à ce sujet.

CINQUIÈME PRINCIPE. — DES VARIATIONS DE RÉGIME D'UNE NAPPE SOUTERRAINE. — Nous avons déjà dit quelques mots à ce sujet dans la première partie.

Le schéma (fig. 50) que nous avons précédemment donné d'une circulation souterraine dans un terrain fissuré, montre bien que, selon la saison et l'intensité du débit des diaclases, une source peut ou ne peut pas être colorée. C'est une question d'opportunité qu'on ne doit pas perdre de vue dans ces études.

Nous avons donné des exemples fournis par M. Fournier pour la circulation souterraine des eaux du Jura.

Schardt fit aussi trois essais successifs de coloration à la fluorescéine en 1902 et 1903 à la Cairasca.

La première expérience, faite le 2 décembre 1902, colora les eaux souterraines du tunnel du Simplon ; la deuxième expérience, faite le 2 avril 1903, donna un résultat négatif, à l'étiage extrême, mais donna un résultat positif aux sources de Gracciani.

Enfin la troisième expérience, faite le 9 juin 1903, au moment des hautes eaux, donna, beaucoup plus rapidement que le 2 décembre 1902, une coloration dans le tunnel.

Nous pouvons citer un exemple personnel d'une variation de régime que nous avons suivie pas à pas dans le cours d'études faites avec M. Guillerd dans la région des sources de l'Avre.

En 1903, MM. Fournier et Magnin avaient prétendu que dans les eaux souterraines, le sel marin dissous et la fluorescéine avaient des vitesses différentes. Ce fait paradoxal méritait d'être contrôlé et c'est dans ce but que nous nous proposâmes de faire plusieurs expériences successives au même endroit. Pour cela, en juin 1903

nous jetâmes 2kg,5 de fluorescéine au bétoire du Haut-Chevrier situé sur le ruisseau du Lamblore (Voy. fig. 95). Au bout de soixante-quatre heures nous obtenions une coloration nettement visible à l'œil nu aux sources de Graviers, Foisys, Rivière, Trou d'eau, Launay et Trois-Mulets.

Résultats de deux expériences consécutives faites dans la région de l'Avre au bétoire du Haut-Chevrier, à 200 heures d'intervalle.

Sources atteintes.	PREMIÈRE EXPÉRIENCE.			DEUXIÈME EXPÉRIENCE.		
	Apparition de la fluorescéine.	Maximum de coloration apparue.	Degré de coloration maxima constatée Milliardième.	Apparition de la fluorescéine.	Maximum de coloration apparue.	Degré de coloration maxima constatée Milliardième.
	Heures.	Heures.		Heures.	Heures.	
Graviers...	Après 66	Après 78	8	0	Après 0	0
Foisys.....	— 64	— 72	72	Après 91	— 93	12
Rivière....	— 64	— 72	240	— 87	— 95	48
Trou d'eau.	— 68	— 78 (1er max.)	90	— 99	— 103 (1er max.)	7
—	»	Après 112 (2e max.)	8	»	Après 125 (2e max.)	10
Launay....	— 72	Après 78 (1er max.)	180	— 99	Après 107 (1er max.)	16
—	»	Après 114 (2e max.)	7	»	Après 125 (2e max.)	18
Trois-Mulets...	— 72	Après 78 (1er max.)	180	— 99	Après 107 (1er max.)	30
—	»	Après 114 (2e max.)	7	»	Après 125 (2e max.)	18

Nota. — Dans chaque expérience, les temps sont comptés à partir du moment où la fluorescéine a été versée dans le bétoire, la distance au bétoire étant de 8km,6.

Au bout de deux cents heures on recommença une autre expérience, en jetant 2kg,5 de fluorescéine dissoute dans une eau contenant environ 10 p. 100 de sel marin.

La dose de sel employée était de 100 kilog. Nous désirions faire ainsi une solution plus lourde que celle employée dans l'expérience et nous espérions, grâce à cette augmentation de densité, que la fluorescéine descendrait plus profondément dans le sol. S'il y avait plusieurs chemins différents, elle pourrait aller ressortir à d'autres sources, d'où diminution de coloration sur la précédente expérience. Au bout de quatre-vingt-sept heures nous retrouvâmes aux sources captées la coloration avec une forte atténuation de coloration (1/5 environ).

Comme la vitesse avait diminué entre les deux expériences, et doutant non sans raison de l'influence du sel, nous nous sommes proposé de recommencer au même bétoire une troisième expérience, deux cents heures plus tard, en employant 2kg,500 de fluorescéine sans sel marin. Cette fois l'expérience fut négative et l'expérience, recommencée huit jours après avec une dose double de matière colorante redonna, pour la deuxième fois, un résultat négatif. Dans l'espace de quinze jours l'abaissement de la nappe fut suffisant pour transformer les conditions d'expérience et rendre négative une expérience positive peu de temps auparavant. Quant au sel marin, son influence fut douteuse.

Les expériences doivent donc être faites en saison sèche et en saison humide, de façon à connaître ainsi les différences de directions des diaclases souterraines.

Les variations de régime tiennent encore, ainsi que nous l'avons déjà signalé, à des effondrements souterrains, à l'ouverture de nouveaux canaux qui drainent les eaux plus facilement vers d'autres sources; et enfin aux tremblements de terre.

On admet que le moindre travail hydrologique (forage, construction d'un puits) peut faire varier le régime hydrologique d'une région. On ne doit donc pas négliger de connaître, par la suite, tous les faits de ce genre qui peuvent subvenir sur le périmètre d'alimentation.



Sixième principe. — Les diaclases forment des réseaux compliqués. — Nous avons supposé précédemment que les diaclases qui transportent les eaux d'un point vers une source sont uniques. Les expériences avec la fluorescéine ont montré qu'il y a souvent plusieurs diaclases avec des vitesses différentes qui transportent l'eau d'un même point vers une même source. Ainsi, à l'Yonne, M. Le Couppey de Laforest a obtenu dans une même expérience plusieurs colorations successives à la même source. Dans l'expérience de Courson, par exemple, la fluorescéine est arrivée à deux moments séparés par un intervalle de plusieurs heures. La première fois avec une vitesse horaire de 76 et 79 mètres, la deuxième fois avec une vitesse de 58 et 59 mètres.

Dans nos expériences successives faites au bétoire du Haut-Chevrier, en mesurant pour chaque prise l'intensité de la coloration, nous avons eu chaque fois une double coloration. M. Fournier, faisant des expériences dans le Jura, avait trouvé avant nous des doubles arrivées de matières colorantes.

Ceci montre donc bien que la fluorescéine et, par conséquent, les eaux souterraines, suivent plusieurs chemins. En possession de ces différents principes, nous pouvons étudier avec fruit les autres procédés pour déterminer approximativement un périmètre.

Emploi de la résistivité électrique et de l'analyse chimique pour déterminer l'origine de l'eau et les périmètres d'alimentation. — Les expériences à la fluorescéine sont longues et coûteuses; elles ne peuvent être employées par tout le monde et ne sont guère à la portée que des agglomérations pouvant s'astreindre à quelques frais.

Les particuliers, les usiniers surtout, qui veulent avoir beaucoup d'eau, évitent de s'engager dans une telle voie, et tout au moins si des expériences de ce genre leur

sont nécessaires, ils cherchent à en restreindre de beaucoup le nombre.

D'autre part, nous avons vu que ces expériences avec la fluorescéine demandent la réalisation d'un certain nombre de conditions dont la principale est la facilité de se procurer un certain volume d'eau qu'il ne faut généralement prendre dans la nappe où on veut envoyer la fluorescéine que dans le cas où, avec des réservoirs, on puisse créer, avant toute expérience, une réserve préalable. Ces conditions viennent alors augmenter encore le prix de ces expériences, et c'est également pour ce motif que les agglomérations urbaines cherchent à ne les tenter que dans les régions où il est à présumer qu'elles réussiront.

Dans le but de répondre à ces conditions, nous avons cherché un moyen rapide, peu coûteux, permettant de se faire une idée assez exacte et approximative d'un périmètre d'alimentation. Cette méthode est basée sur l'emploi de la conductibilité électrique des eaux, conductibilité électrique qui mesure, comme on sait, le degré de minéralisation d'une eau. Notre méthode de détermination d'un périmètre d'alimentation par la conductibilité électrique n'étant décrite nulle part, nous sommes obligé d'entrer dans quelques détails.

On sait, en physique, que dans l'eau pure, l'eau distillée d'une façon spéciale dans des appareils également spéciaux (en or ou en platine), le courant électrique ne peut passer, ou s'il y passe c'est avec une intensité si faible qu'on peut l'attribuer à des traces d'impureté que malgré les appareils employés, on ne peut éliminer.

Qu'on vienne à dissoudre dans cette eau une petite quantité d'un sel quelconque, du sel marin par exemple, aussitôt on verra l'intensité du courant augmenter. Les molécules de sel dissous conduisent le courant électrique. Plus il y a de substance saline, plus le courant électrique passe avec facilité.

On désigne sous le nom de conductibilité électrique

l'inverse de la résistivité électrique de l'eau. La résistivité électrique spécifique d'une eau (qu'on désigne par ρ) est la résistance qu'oppose au courant électrique un volume d'eau ayant 1 centimètre carré de section et 1 centimètre d'épaisseur. La conductibilité est donc désignée par la fraction $\frac{1}{\rho}$. Pour déterminer la résistivité électrique d'une eau on possède un appareil excessivement commode et rapide, celui de Kohlrausch (fig. 61).

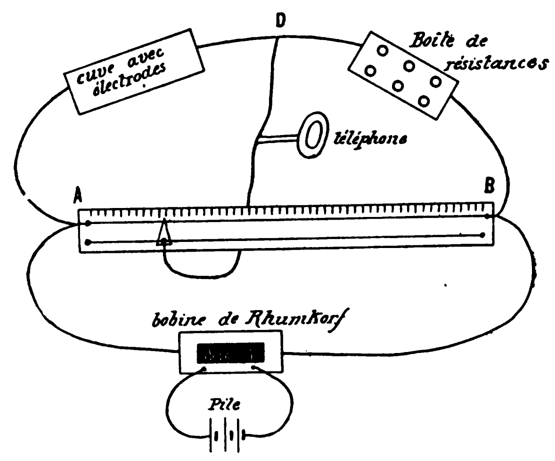


Fig. 61. — Appareil de Kohlrausch.

Sur une règle graduée en millimètres est tendu un fil de platine de $0^{mm},2$ de diamètre. La longueur du fil est de 1 mètre. Les extrémités de ce fil sont en relation avec une bobine de Ruhmkorff d'une part, et d'autre part avec un autre circuit composé d'une cuve, dans laquelle on mettra l'eau, et d'une boîte de résistances. Enfin entre la cuve et la boîte de résistances part un fil par lequel le courant vient actionner un téléphone. Le courant électrique alternatif fourni par la bobine de Ruhmkorff arrive à

l'extrémité du fil. Là il se divise en deux parties, l'une parcourant le fil de platine, l'autre se dirigeant à travers la cuve et la boîte de résistances. Le téléphone qui est installé en pont recevra une partie du courant alternatif tant que le potentiel en D et en C ne sera pas égal. En déplaçant le curseur mobile C tout le long du fil on arrive à trouver un point C pour lequel le téléphone ne donne plus de son. La théorie indique que cette position du curseur C dépend de la résistance de la cuve et de celle de la boîte à résistances.

Si on désigne par Ω la résistance de l'eau dans la cuve, R la résistance de la boîte à résistances, la théorie (1) montre que

$$\frac{\Omega}{R} = \frac{AC}{CB} \text{ d'où } \Omega = R\frac{AC}{CB}$$

Comme Ω dépend des dimensions de la cuve, l'expérience apprend que $\Omega = \rho\frac{l}{s}$, ρ étant le coefficient qu'on désigne sous le nom de résistance électrique spécifique, l la distance des électrodes et s la section mouillée de ces électrodes. Comme c'est ρ qu'on cherche, on a $\rho = \frac{s}{l} R \frac{AC}{CB}$.

Cette méthode de mesure est excessivement sensible et peut être mise entre les mains de beaucoup de personnes après un très faible temps d'apprentissage. La précaution

(1) Le calcul théorique est le suivant. Si I est l'intensité du courant provenant de la bobine de Ruhmkorff, en A le courant se divise en deux autres d'intensité i et i', tels que $I = i + i'$.

D'autre part, la différence de potentiel de A à $D = e' = i'\Omega$ et de A à C $e = ir$ (r étant la résistance du fil AC).

Il n'y aura plus de courant dans le téléphone quand $e = e'$, c'est-à-dire pour $ir = i'\Omega$ (1).

La même condition sera réalisée quand la différence de potentiel entre D et B et C et B sera identique, c'est-à-dire quand $ir' = i'R$ (2), r' étant la résistance du fil CB.

En divisant l'égalité (1) par l'égalité (2) on a :

$$\frac{r}{r'} = \frac{\Omega}{R} \text{ et comme } \frac{r}{r'} = \frac{AC}{CB}, \text{ on tire l'expression } \Omega = R\frac{AC}{CB}$$

à prendre est d'opérer toujours avec de l'eau à même température. On a fixé celle-ci à 18°, l'expérience ayant montré que cette température est la plus commode à obtenir parce qu'elle est celle des laboratoires.

On réchauffe l'eau dans la cuve au moyen d'un ballon en verre rempli d'eau bouillante, on refroidit l'eau par un procédé identique en mettant, à la place de l'eau bouillante, de l'eau froide à 10 ou 11°.

Quelques expérimentateurs préfèrent faire une correction de température, mais ce coefficient de correction est toujours suspect et il vaut mieux opérer à température constante.

Dans le sol, les eaux infiltrées rencontrent des matières qu'elles vont dissoudre. D'abord, à la partie supérieure, des nitrates, des chlorures, et surtout dans la partie la plus profonde des terrains calcaires, du carbonate de chaux.

L'ensemble de toutes ces matières dissoutes constitue le degré de minéralisation d'une eau. Il dépend surtout de la composition des roches traversées et de leur solubilité. Pour acquérir son maximum il faut que le contact de l'eau et de la roche ait une durée suffisante (1). Il est évident, *à priori*, qu'une eau venant d'un terrain sableux ou gréseux ou des schistes argileux (degré hydrotimétrique 4 à 5°) sera beaucoup moins minéralisée que celle venant d'un terrain calcaire ou des schistes lustrés calcaires (degré hydrotimétrique 25 à 30°), celle-ci étant également encore moins minéralisée que celle sortant des terrains gypseux (degré hydrotimétrique dépassant 150°), le sulfate de chaux qui constitue ces terrains étant beaucoup plus soluble dans l'eau que le carbonate, lequel n'est dissous qu'à la faveur du gaz carbonique contenu dans l'air de ces terrains.

C'est ainsi qu'une eau circulant dans les sables a une

(1) La solubilité des corps augmente par les fortes pressions, c'est une cause qui contribue à donner aux eaux de puits artésiens une forte minéralisation.

résistivité électrique variant de 5000 à 7000 ohms (l'ohm étant la résistance électrique d'une colonne de mercure ayant 1m,06 de longueur et 1mmq de section), celle circulant dans les calcaires a une résistivité variant de 1500 à 3000 ohms, enfin celle sortant des terrains gypseux a une résistivité variant de 100 à 1500 ohms. L'intérêt de semblables déterminations est très grand pour le cas des terrains volcaniques, comme dans le Cantal (1), où des traînées de laves très pauvres en chaux sont venues occuper des vallées calcaires. Il y a des eaux pauvres en chaux qui circulent à travers les dépôts volcaniques, ces eaux sont très pures comme composition minérale, mais ne forment souvent que de petits filets de peu d'importance; au contraire, les eaux des terrains calcaires sont beaucoup plus abondantes. Il y a donc un grand intérêt de savoir si on tombe sur l'une ou sur l'autre de ces eaux. D'autre part, la géologie de ces terrains est assez compliquée et confuse; l'analyse chimique est assez longue quand il s'agit d'une première détermination, seule la résistivité électrique permet très rapidement (il faut 5 minutes pour faire une lecture) de connaître cette première origine.

L'analyse chimique a déjà servi a reconnaître l'arrivée à une source dont les eaux viennent de plusieurs gisements géologiques comme nous le verrons. Mais c'est sur un périmètre d'alimentation assez vaste formé généralement d'un seul terrain sédimentaire important qu'il faut, le plus souvent, déterminer la position et l'étendue du périmètre d'alimentation des eaux souterraines de la localité étudiée.

Nos études poursuivies pendant plusieurs années nous ont permis de constater des faits inattendus qui nous permettent d'étudier un périmètre d'alimentation dans toute l'étendue d'un gisement géologique très vaste.

(1) Duclaux, Hydrologie souterraine, *Annales de l'Institut Pasteur*, 1904.

D'abord il nous a fallu démontrer qu'une source pouvait, pendant toute l'année, conserver un degré constant de minéralisation, en un mot que sa résistivité électrique demeurait constante.

Pour cela nous avions quelques sources captées par la Ville de Paris dont la conductibilité électrique se maintient constante à l'état normal.

Ainsi je citerai :

Groupe des sources du Loing et du Lunain.....	S. de Saint-Thomas.... S. du Coignet.........	dont la résistivité varie en temps normal de 2,360 à 2,375.
	S. du Sel.............. S. du Bignon de Bours .	de 2,430 à 2,470.
	S. de Chaintréauville.. S. de la Joie...........	de 2,730 à 2,760.
S. de l'Avre.	S. du Breuil.............	de 2,695 à 2,720.
S. de la Dhuys.	S. de Pargny............	de 2,120 à 2,140.
S. de la Vanne.	S. de la Bouillarde.......	de 2,400 à 2,420.

Quand on songe qu'une différence de 20 ohms représente à peine 1 milligramme de carbonate de chaux, on en conclut que ces eaux ont une composition très constante. Nous verrons plus loin que certaines industries agricoles réclament de telles eaux.

Les sources du Loing et du Lunain, par exemple, sortent toutes de la craie sénonienne. Elles sont classées deux par deux, par groupe, et chaque groupe a une composition identique ; or le débit de chaque groupe est le suivant :

	A la seconde.
Groupe de Saint-Thomas et du Coignet..........	146 litres.
— du Sel et du Bourron....................	96 —
— de Chaintréauville et la Joie.............	221 —

L'emploi du coefficient de Paramelle, relatif au profit des eaux souterraines en eaux de pluie, attribue pour le périmètre d'alimentation des sources de Saint-Thomas et du Coignet une étendue de terrain très approximativement d'environ 109 kilomètres carrés ; pour celui des sources de

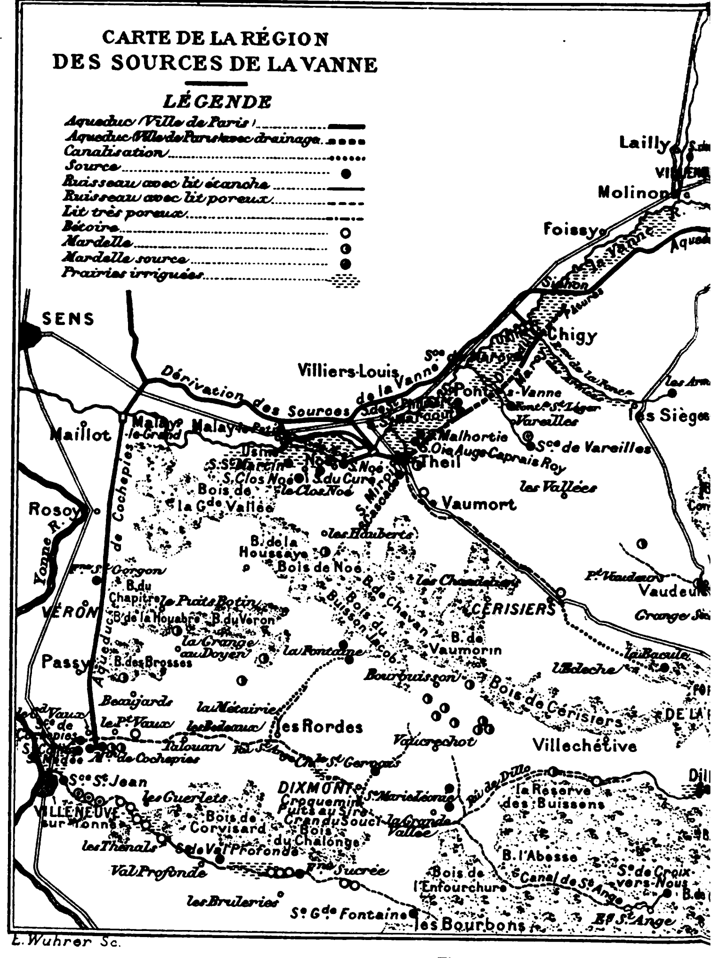
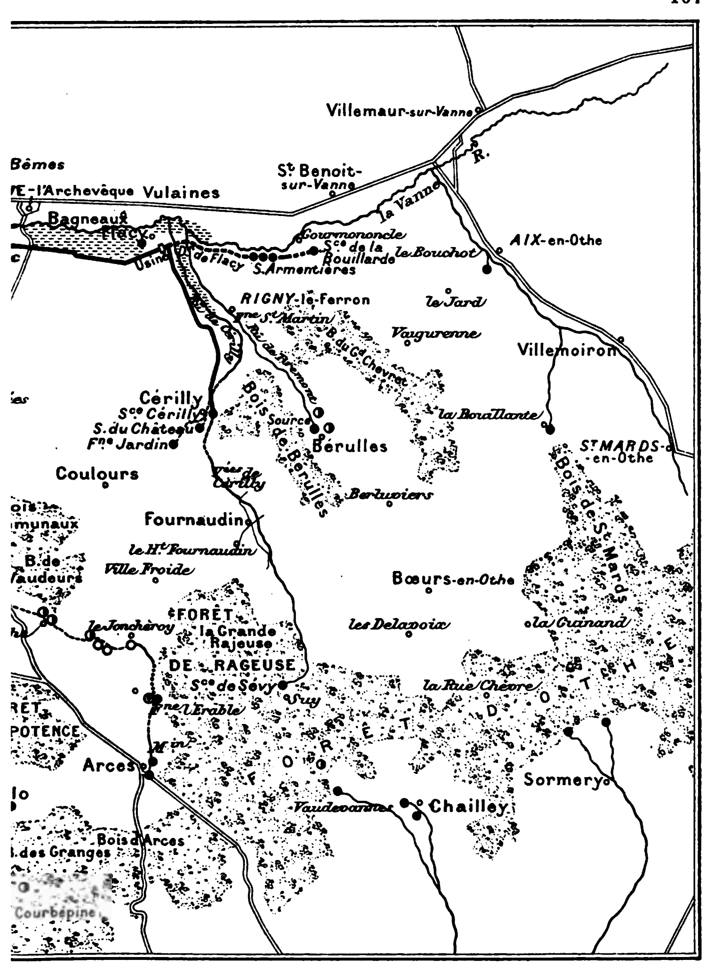


Fig. 62.— Carte de la région des sou



urces de la Vanne (voy. p. 176).

Bourron et du Sel, environ 80 kilomètres carrés; pour celui des sources de Chaintréauville et de la Joie, environ 175 kilomètres carrés.

Pour que toutes les eaux infiltrées sur un périmètre d'alimentation d'une telle étendue soient de composition aussi constante, il faut que tous les filets d'eau alimentant la diaclase de la source viennent se mélanger en proportion à peu près identique, ce qui s'explique difficilement comme nous le verrons, quand il y a mélange d'une infinité de filets d'eau de composition très différente.

D'autre part, en admettant même qu'il existe une infinité de filets d'eau de composition différente, il faut, que sur le périmètre des sources de Chaintréauville et la Joie il y ait une plus grande proportion de filets d'eau de plus forte résistivité que sur le périmètre des sources de Saint-Thomas et du Coignet.

Même pour ces dernières sources, on s'aperçoit que la plupart des filets d'eau qui les alimentent doivent avoir une composition très uniforme parce que, soit à l'amont, soit à l'aval, les sources qui les entourent ont une composition très voisine (comprise entre 2 350 et 2 400 ohms). Si la majorité des filets d'eau qui leur donne naissance n'avait elle-même une composition très voisine de 2 350 à 2 400 ohms, on s'expliquerait difficilement cette uniformité de minéralisation.

Il faut donc admettre qu'il peut exister, sur un vaste gisement sédimentaire comme la craie sénonienne, des parties assez étendues ayant des résistivités uniformes se différenciant les unes des autres; la partie voisine du Lunain a une résistivité de 2 350 à 2 400 ohms; celle qui alimente les sources de Chaintréauville et la Joie a une majorité de filets d'eau de résistivité voisine de 2 700 à 2 800 ohms. En résumé, la résistivité électrique constitue le caractère différentiel des eaux venant de parties différentes d'un périmètre d'alimentation. Au lieu d'employer une matière colorante, comme la fluorescéine, ou encore

le sel marin, pour différencier les molécules d'eau qui partent d'un point pour se diriger vers les sources étudiées, nous nous servons de la propriété qu'a le sol de fournir aux eaux des quantités différentes de matières salines. L'étude d'un périmètre d'alimentation aura donc pour objet de voir la composition de l'eau dans différentes sources et puits situés à l'amont, d'en déterminer la résistivité électrique et de chercher la partie du périmètre pour laquelle, en faisant la moyenne des résistivités trouvées, on obtient le chiffre très voisin de la résistivité de la source étudiée.

Les détails d'une telle opération ne peuvent être donnés avant de répondre aux objections qui peuvent être faites à cette méthode.

La composition minérale d'une eau, sortant de terrains calcaires, dépend de sa teneur en acide carbonique (1). Elle est aussi en rapport avec le temps que l'eau reste en contact avec le sol calcaire, car il est évident que la dissolution du carbonate de chaux n'est pas instantanée. Avec un contact insuffisant entre l'eau et la roche, le degré de minéralisation sera moindre. Le degré de minéralisation des eaux de Chaintréauville et de la Joie, plus petit que celui des sources de Saint-Thomas et du Coignet,

(1) On admet que l'origine du gaz carbonique des eaux souterraines provient des combustions organiques de la surface du sol. Les cultures, les engrais, angmenteraient la proportion de ce gaz, de même les saisons et les labours qui ont une si grande importance sur ces combustions.

Cette origine n'est pas unique. Les pyrites contenues dans certains terrains s'oxydent, donnent de l'acide sulfurique que l'eau entraîne. Si celle-ci rencontre du carbonate de chaux, il se forme du gaz carbonique résultant de l'attaque de la roche par l'acide.

Enfin, le sol dégage du gaz carbonique d'origine plus profonde. Dans les régions volcaniques ou très remaniées, les cas sont très fréquents. Daubrée en cite de nombreux exemples. En Auvergne, des accidents se produisent souvent, dus aux dégagements inopinés de ce gaz asphyxiant.

Dans les terrains sédimentaires non remaniés, comme la craie, on rencontre quelquefois des dégagements assez abondants de gaz carbonique au fond des puits (puits des Boscherons près d'Évreux, puits Morissat à La Guinaud, signalé par M. Le Couppey (source de la Vanne), etc.).

peut être attribué à un contact insuffisant de l'eau avec le sol.

Nous désirons démontrer qu'il n'en est pas ainsi. En effet les sources du groupe de Chaintréauville ont un périmètre d'alimentation situé, en majeure partie du moins, sur la rive gauche du Loing. Il n'y a sur toute son étendue aucune eau de ruissellement, les eaux des pluies s'absorbent immédiatement et uniformément.

Dausse, nous l'avons déjà dit, a montré qu'en été les pluies ne profitent pas à la nappe, enlevées au sol par l'évaporation très intense à cette époque. Cette période d'été s'étend du milieu de juin au milieu d'octobre. Il faut donc admettre qu'au mois d'octobre, la majorité des eaux, ressortant aux sources, s'est infiltrée sur le périmètre des sources de Chaintréauville depuis au moins trois mois. Ce contact déjà prolongé n'a pas eu pour effet de faire varier le degré de minéralisation qui, comme nous l'avons dit, reste constant. Mais un contact de trois mois d'eau distillée, ayant dissous CO^2 dans l'air, avec de la craie suffit pour dissoudre, dans les conditions de l'expérience, le maximum de calcaire que cette eau peut accaparer. On comprendrait difficilement que dans le sol il en soit autrement.

D'autre part, à la source de la Dhuys où des eaux de ruissellement viennent souiller la source, il faut environ de quinze jours à trois semaines, après la fin des eaux de ruissellement, pour que le degré de minéralisation redevienne normal.

La différence du degré de minéralisation entre les sources de Saint-Thomas et de Chaintréauville ne tient donc pas à un contact plus ou moins prolongé avec le sol.

Cette conclusion, tirée d'un raisonnement d'ordre hydrologique, peut être démontrée par l'expérience. Si, dans les conditions de l'expérience l'eau de la source de Chaintréauville n'a pas eu un contact suffisant avec le calcaire

du sol, il suffira de prendre de l'eau de cette source, de l'agiter en présence de carbonate de chaux pur pour voir le degré de minéralisation augmenter.

Nous avons fait cette expérience en nous entourant d'un certain nombre de précautions qui sont :

1° Récolter l'eau à son émergence même et empêcher le départ du gaz carbonique. Il faut en effet opérer dans des conditions à peu près identiques à celles du sol, et la tension du gaz carbonique en dissolution dans l'eau est très importante dans cette expérience.

2° Mettre les flacons à l'abri de la lumière, car sans cette précaution des algues vertes se développent et du gaz carbonique est consommé. D'où dépôt de CO^3Ca dû à la disparition du gaz et perte dans le degré de minéralisation.

En outre de ces précautions, on exagère intentionnellement les conditions de l'expérience en plaçant les flacons contenant du carbonate de chaux à une température un peu supérieure à celle du sol. On sait en effet que la solubilité du carbonate de chaux augmente avec la température.

En agitant fréquemment les flacons pendant quinze jours, on trouve, après ce laps de temps, que les eaux des sources de Chaintréauville, pas plus que celles de Saint-Thomas, ne sont susceptibles de dissoudre une plus grande proportion de carbonate de chaux. Leur différence de résistivité électrique n'est donc pas due à cette circonstance, tout au moins pour la source de Chaintréauville, que le contact des eaux avec le sol a été insuffisant pour dissoudre la quantité maxima de carbonate de chaux capable d'être solubilisée par les eaux dans les conditions de température et de tension de gaz carbonique où elles sont placées, ce qui confirme notre raisonnement hydrologique. Pour acquérir leur maximum de minéralisation, les sources doivent séjourner un temps suffisant dans le sol. En temps de crue, cette condition n'est pas réalisée.

L'étude de MM. Rahir et du Fief (1), étude exclusivement chimique, ayant porté sur les eaux engouffrées dans diverses cavernes belges, aboutit à un résultat à peu près identique.

Prenons pour commencer la grotte de Remonchamps. Les eaux qui y circulent, formant le Rubicon, sont constituées par les pertes de nombreux petits ruisseaux dont la composition chimique est loin d'être identique. L'eau du Chantoir d'Adseux représente environ la moyenne de la composition chimique de tous ces ruisseaux. Malgré ces mélanges en proportion variable et la composition également variable de chacun d'eux (comme on s'en aperçoit au Chantoir d'Adseux par les deux analyses qui en ont été faites en saisons différentes) le résidu fixe et la teneur en carbonate de chaux se maintiennent à peu près constants.

Pour le Lomme et la Wamme, MM. Rahir et Fief n'ont fait qu'une analyse mais, d'après ce que nous verrons par la suite relativement à la température, on peut considérer que le contact de l'eau avec le sol a été suffisant et le résidu fixe ne doit pas dépasser de beaucoup la teneur de 90 milligrammes par litre.

Au contraire la Lesse parcourant rapidement la grotte de Han et ressortant avec la même température qu'à l'entrée, n'a pas le temps d'échanger de la chaleur avec le sol, car son contact n'y est pas assez intime, et la dissolution de carbonate de chaux pendant ce parcours y est très faible (3 à 4 milligrammes) malgré la teneur assez élevée en acide carbonique libre ou demi-combiné.

Au contraire, à une autre perte de la Lesse, au Puits des Veaux, le contact de l'eau avec le sol est assuré par leur stagnation dans un lac souterrain. La dissolution du calcaire y est plus grande (39 milligrammes) et la température est bien celle d'une eau souterraine de cette région.

(1) *Bull. de la Société belge de Géologie*, 1901, p. 11.

	DATE 1906.	Température de l'air.	Température de l'eau.	A. carbonique libre ou bi-combiné en mmgr.	A. carbonique fixe en mmgr.	A. carbonique libre ou bicombiné en volume cc³.	A. carbonique fixe. en volume cc³.	Résidu fixe à 180° en mmgr.	Carbonate de chaux en mmgr.	Silice en mmgr.	OBSERVATIONS
Entrée du Chantoir d'Adseux.	4 avril	8°	5°5	22	13	11, 1	6 9	58	23	»	Les eaux du Chantoir d'Adseux circulent dans la gr. de Remonchamps avant d'arriver au jour.
Rubicon (grotte de Remonchamps).	—	10°	8°5	57	92	28, 9	46, 7	204	135	»	
Entrée du Chantoir d'Adseux.	24 juill.	26°5	23°	15	41	7, 7	21, 1	104	48	»	
Rubicon (grotte de Remonchamps).	—	13°	11°	39	99	20, 0	50, 0	203	135	»	
Lomme et Wamme (à On et Jemelle)	17 mai	17°	16°	16,5	17	8, 3	8, 9	30	191	»	Les eaux de la Lomme et de la Wamme ressortent à la source d'Eprave.
Sortie Lomme et Wamme (source d'Eprave)..........	—	11°5	9°5	27,5	44	13, 9	22, 2	90	51	»	
Lesse au gouffre de Belvaux (grotte de Han)...........	23 avril	16°	14°5	19	14	10	7, 2	38	17	»	La Lesse se perdant au gouffre de Belvaux et ressortant de la gr. de Han.
Lesse à la sort. de la gr. de Han.	—	13°	13°	45	18	22, 8	9, 4	46	20	»	
— au gouffre de Belvaux.	17 août	18°	19°	»	»	»	»	80	29	20	
— à la sort. de la gr. de Han.	—	17°	18°	»	»	»	»	100	33	20	
— à Furfooz.............	19 juill.	30°	24°	»	»	»	»	92	58	»	
Eau de puits des Veaux (lac souterrain alimenté en temps de crue par une perte de la Lesse)..............	—	»	11°5	»	»	»	»	170	97	»	

On peut se demander à quelle cause peut tenir cette différence constatée dans la composition minérale d'une eau sortant d'un même gisement géologique. En dosant l'acide carbonique libre de l'eau au sortir des sources de Chaintréauville et de Saint-Thomas, on constate que la proportion de ce gaz est plus faible dans la première que pour la seconde. La différence de composition minérale peut tenir à la proportion différente d'acide carbonique, mais cette explication est-elle suffisante ?

Les zones de faible et forte conductibilité électrique sont souvent très bien tranchées. Un puits ayant une résistivité de 2800 ohms peut être à quelques mètres seulement d'un autre puits de résistivité voisine de 2000 ohms (exemple trouvé à Chaintréauville pour deux puits creusés dans la craie en place à 18 mètres de profondeur).

D'autre part, sur les bords de la rivière d'Avre, en aval de la ville de Verneuil, on trouve quelques sources comme les 5 émergences de la source du Breuil et la source La Valette. En descendant le cours de la rivière d'Avre, à partir de l'émergence le plus amont de la source du Breuil, on constate que la résistivité augmente très régulièrement, passant insensiblement de 2650 à 2800 ohms, sur un espace d'environ 300 mètres. Dans la vallée du Betz, affluent du Loing, on trouve une série de sources de très petits débits ayant des résistivités différentes entre elles, mais assez constantes dans le cours de l'année.

Pour ces motifs, il est bien difficile d'admettre que la variation de la proportion du gaz CO^2 sur un espace aussi restreint suffise par elle seule à expliquer ces différences de composition. Nous sommes d'avis d'admettre encore l'influence d'une composition différente du sol qui permet au carbonate de chaux et aux autres substances de se dissoudre en proportions variables, toutes choses égales d'ailleurs. [Nous avons comparé Chaintréauville et Saint-

Thomas parce que la température de leurs eaux est identique (12°,2)].

Quelle que soit la cause qui agit, même si le degré de minéralisation tient uniquement à une proportion différente de CO^2 dans le sol, notre méthode demeure exacte, les variations dans le degré à peu près constant de minéralisation étant seules envisagées. Ce que nous venons de dire peut être mis sous forme d'un principe qui est le suivant :

Un vaste périmètre d'alimentation comme la craie peut être divisé en un certain nombre de zones dont les eaux souterraines ont un degré de minéralisation différent. La cause de ces différences peut tenir à une composition différente des diverses parties du périmètre et également aussi à des tensions différentes du gaz CO^2 contenu dans l'air de ces terrains.

Nous avons eu l'occasion d'appliquer cette méthode aux sources de la Vanne. Il est évident qu'elle ne peut donner que des indications, mais, comme nous l'avons dit au commencement de ce chapitre, c'est une méthode qui a pour but de reconnaître les points où il y a lieu de tenter avec succès des expériences avec les substances dissoutes pour être fixé complètement sur le périmètre d'alimentation cherché.

Dans les régions où ces zones sont multiples et de peu d'étendue, cette méthode rendra peu de service, elle est surtout utile à la Vanne comme au Loing, quand les zones apparaissent assez bien tranchées et d'étendue assez grande.

Dans les régions de la Vanne (fig. 62, p. 150 et 151), on trouve, aux environs de Saint-Benoist, un certain nombre de sources captées par la Ville de Paris. En allant de l'amont vers l'aval, on trouve :

			En moyenne.
S. La Bouillarde........	2.450 ohms.	Le débit est...	40 lit.
S. Armentières (amont).	2.800 —	—	500 —
— (aval)...	2.600 —	—	
Drains de Flacy........	2.320 —	—	106 —

Toutes ces sources sortent de la craie sénonienne et sont voisines. Elles ont une composition très variable. Comme formation, ces sources sont très différentes : Les sources Armentières sortent de diaclases qui viennent en affleurement en cet endroit, la source La Bouillarde sort d'un effondrement, les eaux du drain de Flacy n'ont vu le jour qu'à la suite des travaux de captation, elles ont circulé à travers les terrains environnant Flacy. Le degré de minéralisation de ces dernières représente celui que ces terrains, proches de la vallée de la Vanne, peuvent fournir aux eaux souterraines. Pourquoi une différence de composition entre la source Armentières aval et la source Armentières amont ? D'autre part, pourquoi une si grande différence de minéralisation entre les sources Armentières et celle de la Bouillarde et des drains de Flacy ?

La source Armentières principale débouche dans la galerie de captation par une série de diaclases dans lesquelles on peut prendre de l'eau (fig. 63). M. Marrec a pris de l'eau en 6 endroits, la partie gauche de la figure représentant la partie voisine de la source Armentières aval.

Émergence,	1...............	2.827 ohms.
—	2...............	2.823 —
—	3...............	2.822 —
—	4...............	2.822 —
—	5...............	2.815 —
—	6...............	2.675 —

On voit que toutes ces diaclases donnent une eau identique, sauf celle qui est la plus rapprochée d'Armentières aval dont la conductibilité est plus forte. La source Armentières aval est donc le débouché d'une autre diaclase qui, par un émissaire, communique avec la source Armentières principale.

Le périmètre d'alimentation d'une source débitant 500 litres exige une étendue d'environ 370 kilomètres

carrés, c'est-à-dire un carré de 14 kilomètres de côté. Il y a donc en certains points du périmètre un vaste espace capable de fournir des eaux de résistivité moyenne égale à 2800 ohms, et très sensiblement différent des zones alimentant la Bouillarde ou le drain de Flacy, de résistivité plus faible comme nous venons de le voir.

Sur le périmètre, vers l'amont de ces sources, on

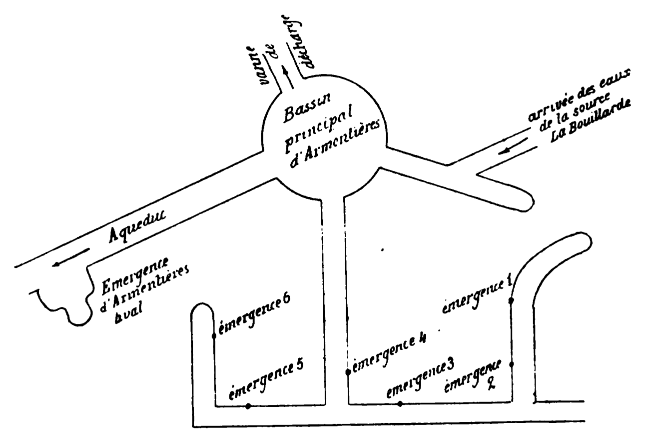


Fig. 63. — Plan des émergences alimentant la source d'Armentières.

trouve, sortant toujours de la craie, d'autres émergences. Ainsi dans la vallée de la Nosle on trouve :

Source d'Aix-en-Othe..........	2.650	ohms.
Source de Craney, *a*...........	2.350	—
— — *b*...........	2.450	—
Source de Craney-le-Château...	2.425	—
Source la Bouillante...........	2.474	—

Toutes ces sources ont une résistivité voisine de celle de la Bouillarde et par conséquent doivent appartenir au même périmètre.

Dans la vallée du ru de Tiremont, on trouve la Fontaine Saint-Martin à Rigny-le-Ferron, de résistivité assez

variable (2 660 ohms à 2 265 ohms) et la source de Bérulles (2 812 ohms). Cette dernière ressemble beaucoup à la résistivité de la source Armentières principale et semble être placée sur le même périmètre.

Dans la vallée du ru de Cérilly, on trouve la source de Cérilly (2 650 ohms), du château Cérilly (2 605 ohms), le drain de Cérilly (2 420 ohms), la Fontaine Jardin (2 457 ohms), la source de Coulours (2 485 ohms). La résistivité de la source Cérilly est intermédiaire avec celle de Bérulles et celle de la Fontaine Jardin, elle apparaît dès le premier moment comme un mélange de ces deux nappes. Déjà après cette première étude, on peut rattacher la source de Bérulles au périmètre des sources Armentières. Les puits de toute la région située entre Armentières, Bérulles et Cérilly, déjà assez rares, sont pour la plupart contaminés. Aucun, parmi ceux qui sont encore indemnes de contamination ne donne une résistivité supérieure à 2 400 ohms.

Le périmètre d'alimentation des eaux dont la résistivité est voisine de 2 800 ohms ne doit très probablement occuper qu'une étroite zone, de Cérilly jusqu'à la Vanne. Pour trouver un périmètre ayant une superficie de 370 kilomètres carrés, il faut découvrir, en amont de Cérilly, une vaste surface dont les eaux ont une résistivité supérieure à 2 700 ohms.

Et en effet, l'examen de l'eau des puits de cette partie amont, là où il n'y a pas de sources, vérifie ces conclusions.

Puits Petites vallées..........	2.590	ohms.	Puits à courant.
— Bœurs en Othe.........	2.970	—	
— —	2.590	—	
— La Guinand...........	2.800	—	
— —	2.750	—	
Source de Sévy.......	2.700	—	

et de l'autre côté de la forêt d'Othe :

Source de Chailley, 1..........	2.655	ohms.
— — 2.........	2.872	—
— de Sormery..	3.000	—

Le périmètre d'alimentation des sources d'Armentières est donc situé, du moins en grande partie, dans la forêt d'Othe, en amont de Bérulles.

A la Guinand on trouve deux puits à courant. Une expérience à la fluorescéine faite dans l'un d'eux démontra la communication de cet endroit avec les sources d'Armentières et Bérulles. Comme la Guinand est à l'amont d'une vallée dont la source Berulles occupe un point, on peut soupçonner à juste titre qu'il y a de l'eau en assez grande abondance dans cette vallée. De même, dans les vallées qui débouchent aux Berluviers, on peut espérer avoir de l'eau de composition voisine de 2 600 à 2 800 ohms. Nous verrons plus loin comment on doit creuser un puits pour disposer de beaucoup d'eau.

Cette région, en amont de Bérulles, semble très riche en eau souterraine; et l'étude rapide que nous venons de faire a donc suffi pour nous permettre de prévoir dans quels terrains et en quels endroits on peut trouver de l'eau en même temps qu'on démontre l'emplacement du périmètre de certaines sources.

Cette zone à 2 700-2 900 ohms, située dans la forêt d'Othe, est excessivement étendue. Elle trouve un autre émissaire très important dans la vallée de Cerisiers-Vaumort dont les eaux débouchent aux sources de Theil et de Noë et en partie au moins dans la vallée du ru de Saint-Ange.

Notre méthode étendue à la vallée de Cerisiers, par exemple, montre que tout le long de cette vallée depuis Theil jusqu'à Cerisiers s'écoulent des eaux de résistivité électrique voisine de 2 900 ohms. A Cerisiers il y a deux vallées, l'une à l'extrémité de laquelle on trouve la Bacule, provenant d'une zone de faible étendue, de résistivité électrique égale à 2 500, et l'autre à l'extrémité de laquelle est Villechétive. Les eaux à 2 900 arrivent de préférence par la vallée de Villechétive.

C'est ce qu'une expérience à la fluorescéine a démontré.

Pour ce qui concerne la source de Cérilly dont la résistivité est 2650 ohms, il y a lieu, avons-nous déjà dit, de soupçonner un mélange de deux eaux, l'une venant de la zone à 2 700-2 800 ohms, l'autre venant de la region alimentant la Fontaine Jardin par exemple. La position de la source de Cérilly est au milieu d'une vallée dont la partie amont reçoit des eaux à 2 700 ohms venant de la S. de Sévy et, par une petite vallée secondaire, des eaux venant d'Arces à 2735 ohms. Il y a tout lieu de penser que des eaux de cette partie arrivent à Cérilly. Une expérience à la fluorescéine faite à la Joncheroy en a démontré la réalité. Mais en outre, l'expérience à la fluorescéine faite à la Guinand a démontré que les eaux de ce point ressortent, en faible quantité il est vrai, mais sans aucun doute, à cette source de Cérilly. Son périmètre apparaît comme fort vaste quoique le débit ne soit cependant que de 250 litres à la seconde. Ceci tient à ce fait qu'un périmètre n'est pas exclusif d'une seule source. Les ailes de ce périmètre contribuent plus ou moins faiblement, comme c'est le cas de la Guinand pour Cérilly, à l'alimentation des sources voisines.

En vertu du principe de la répartition régulière des zones d'alimentation des sources, on était en droit de soupçonner que son périmètre principal était à l'ouest de celui d'Armentières ; c'est ce qui a été vérifié en effet.

Par ces exemples rapides, tirés d'une région qui nous est bien connue, nous croyons avoir fait saisir l'utilité des méthodes indiquées pour déterminer un périmètre d'alimentation.

La conductibilité d'une source sert même à déceler les arrivées d'eau brusquement infiltrées dans le sol après un orage localisé.

Les eaux de pluie sont en effet peu riches en sels, donc peu conductrices de l'électricité. Elles ont pour effet, quand elles arrivent très rapidement aux sources de faire varier la conductibilité électrique des eaux. Dans

ce cas la région où l'orage localisé s'est déclaré appartient donc, au moins en partie, au périmètre d'alimentation de la source dont la résistivité a augmenté.

La composition chimique, comme la conductibilité, peut servir à déterminer l'emplacement d'un périmètre d'alimentation.

C'est en se basant sur cette méthode que MM. Swarts, Donny, Chandelon et Kupferschlœger sont arrivés à trouver l'origine des eaux de Spa sur le plateau des Hautes-Fagnes.

M. Imbeaux préconise cette méthode pour reconnaître le mélange d'une source d'eau de plusieurs nappes différentes, comme dans l'exemple de la figure 42. Il faut pour cela connaître, par forage, la composition chimique approximative des eaux des différentes nappes. Si elle est suffisamment différente pour chacune d'elles, l'analyse chimique ou la conductibilité électrique permettra de reconnaître un mélange de plusieurs de ces eaux à une source située au bas des éboulis.

La minéralisation des eaux phréatiques peut varier dans de très grandes proportions et ne pas servir à l'étude des périmètres d'alimentation quand, dans le sol, on rencontre, plus ou moins accidentellement, soit des lentilles de sulfate de chaux, soit des pyrites qui peuvent s'oxyder et se transformer en sulfate.

C'est ainsi, par exemple, d'après le mémoire de J. Vançl sur les eaux de Breslau, qu'à la suite d'une crue de l'Oder, les eaux souterraines contenues dans ces vastes plaines du diluvium glaciaire changèrent de composition.

	Mai 1905.	31 Mars 1906.
Résidu sec..........	221,6	642
Acide sulfurique.....	72,0	315,6
Chlore..............	17,0	15,3
Acide nitrique.......	5,4	néant (un peu d'ammoniaque).

Chaux	58,0	149,7	
Magnésie	9,7	7,9	
Dureté totale	7,0	16,1	(degrés allemands).
— persistante	4,9	16,1	
— temporaire	2,1	0	

Cette variation affecta surtout l'acide sulfurique, la chaux, fit disparaître la dureté temporaire, c'est-à-dire le carbonate de chaux, en même temps qu'il se produisit une dissolution abondante de manganèse.

Or, d'après le Dr Luedecke, les eaux de cette nappe n'ont jamais cette minéralisation. Il y a autour des puits de captation des bancs de pyrites qui, en s'oxydant, produisent les effets constatés dernièrement à Breslau.

La présence d'ammoniaque, la disparition de la dureté temporaire indiquent bien une action d'oxydation des pyrites, dont les produits ont été entraînés lors de la crue de l'Oder.

III

TEMPÉRATURE DES EAUX

Pour déterminer l'emplacement approximatif d'un périmètre, on s'aide très souvent de l'étude de la température des eaux souterraines, méthode simple, facile et peu coûteuse.

Dans le sol, les eaux sont susceptibles d'être influencées par la température de l'air jusqu'à une profondeur de 10 mètres. On admet qu'à cette distance elles ont la température moyenne du lieu et en s'enfonçant plus profondément elles gagnent de la chaleur par suite du réchauffement progressif de la terre en profondeur. La température augmente ainsi de 1° quand on est descendu de 30 à 40 mètres dans le sol.

Le puits artésien de Grenelle à Paris, dont la profondeur est de 548 mètres, donne de l'eau à 27°,4, ce

qui correspond à un accroissement de 1° pour 31m,9 de profondeur.

M. Schardt, dans l'étude du tunnel du Simplon, a trouvé des eaux froides voisines d'eaux très chaudes qui s'étaient mélangées à travers les fissures qu'on avait recoupées dans le travail du percement. D'après ce savant, les eaux froides sont des eaux descendantes, les eaux chaudes sont des eaux ascendantes et il semble s'établir dans le sol une circulation analogue à celle du thermo-siphon. La température d'une source serait alors la résultante d'un mélange de ces deux eaux. En été et en hiver le mélange étant différent, la température serait variable. Elle augmente en été parce qu'à cette époque les eaux de profondeur sont à peu près les seules à fournir l'alimentation des sources; elle diminuera en hiver à cause de l'arrivée d'eau descendante provenant des pluies. Mais à la montagne l'effet est inverse. En hiver les eaux superficielles sont gelées et c'est lors de la fonte des neiges, de juin en avril, qu'elles ont leur maximum de débit.

Dans ces conditions, la variation de la température des eaux souterraines est inverse de la variation de température de l'air extérieur.

Daubrée a montré que dans la plaine et les collines basses de l'Alsace, soit encore dans les vallées des Vosges et de la Forêt Noire, la température moyenne des sources situées à même altitude est identique à 0°,8 près, malgré la variété des terrains, leur relief et leur exposition.

Daubrée admet que ce sont les roches qui communiquent leur température aux eaux d'infiltration.

Toutefois il est utile de faire observer que ceci est juste quand les diaclases sont fines ; avec de grosses diaclases, la masse d'eau qui circule fournit une quantité de chaleur non négligeable.

Dans les cas simples, quand deux sources voisines ont une température différente, on pourrait croire que la

plus chaude arrive d'une diaclase plus profonde que la plus froide ; ceci n'est pas toujours exact. Par exemple, supposons deux sources voisines dont l'une ait un périmètre placé sous une montagne élevée, l'autre en plaine. La température de ces deux sources sera différente parce qu'en montagne la température moyenne de l'air est moindre qu'en plaine et celle de leurs eaux également.

L'exposition du périmètre, malgré l'opinion contraire de Daubrée, a également quelquefois son importance. Nous avons vu comment on expliquait le mécanisme de la formation des glacières naturelles. Il est évident qu'en petit, et sans aller jusqu'à l'abaissement de température à 0°, l'exposition d'un périmètre au nord, abrité contre les ardeurs du soleil, ou encore un périmètre couvert de bois dont les feuillages et la transpiration abondante refroidissent l'air, influeront sur la température des sources.

Comme exemple de l'emploi de la température pour déterminer le périmètre d'alimentation d'une source, nous citerons le cas de *Gagri* (Russie). La température des sources a été trouvée inférieure de 4° à 5° à la moyenne annuelle du lieu de l'émergence. On reporta le périmètre d'alimentation sur le massif crétacé de l'Arabik (2 660 mètres au-dessus de Gagri) et on y trouva en effet de nombreuses absorptions d'eaux atmosphériques avec de nombreux *lapiaz* alimentant la source.

La plus grande glacière connue, celle de Dolschau, refroidit également les eaux qui viennent circuler à son voisinage.

De même, on trouve que la température moyenne de la Fontaine de Vaucluse est inférieure de 2° à la température moyenne du lieu occupé par la source, parce que son périmètre occupe à l'amont un bassin situé entre 600 et 1 400 mètres d'altitude.

Dans l'Isère, les Gillardes sont refroidies de plus de 3° par les eaux des neiges souterraines des chouruns du Dévoluy qui les alimentent.

Aux sources captées dans la vallée du Loing, on trouve que la température fournit des résultats intéressants pour déterminer un périmètre d'alimentation.

Nous avons déjà dit qu'il y avait dans la vallée du Loing deux groupes de sources, l'un placé près de Nemours, formé par la réunion des sources de Chaintréauville et la Joie, l'autre situé près de Bourron comprenant les sources de Bourron et du Sel. Au point de vue de leur minéralisation ces eaux sont un peu différentes, le premier groupe a une résistivité de 2 750 ohms, et seulement de 2 450 ohms pour le deuxième.

Leur température est également différente : 12°,2 pour le groupe de Nemours, 11°,4 pour celui de Bourron. Pourquoi cette différence, attendu qu'aucune de ces sources ne reçoit d'eau de ruissellement et que l'altitude des sources de Bourron est à 54 mètres au-dessus du niveau de la mer, celle des sources de Nemours à 60 mètres? Ceci tient au périmètre d'alimentation qui est différent.

Les eaux de Nemours viennent d'une partie dénudée et cultivée du plateau de la rive gauche du Loing. La moyenne des températures des puits de cette région est de 12°,2. Au contraire le périmètre des sources de Bourron semble plutôt situé sur un sol boisé. Les puits d'Ury, Recloses, La Chapelle-la-Reine creusés dans cette partie du périmètre ont une température voisine de 11°,4. Le périmètre des sources de Bourron doit être cherché dans ces parages.

La forêt refroidit en effet le sol. On admet à la suite d'expériences faites en Amérique, que la température moyenne du lieu est abaissée de 1° environ.

Cette remarque est importante pour rechercher l'origine des sources dans certaines régions boisées dont la température doit être plus basse que celle des régions dénudées (1).

(1) *Bull. Soc. Ingén. civ. de France.* Chronique, mai 1904.

Dans les terrains sédimentaires peu bouleversés, comme c'est le cas à peu près général qu'on a à résoudre, les variations de température des eaux souterraines sont presque insignifiantes si les sources ne reçoivent pas d'eau superficielle par les bétoires. C'est ainsi qu'aux sources du Loing et du Lunain la température varie de 0°,1 dans le cours de l'année, aux sources de la Vanne elle varie de 0°,2 à 0°,4. Elle est au contraire plus variable aux sources de l'Avre, 2 à 4°, et nous connaisons une source, celle de Champy, près de Pargny-la-Dhuys, dont la température varie de 3° C. à 16° C.

Ces dernières sources reçoivent des eaux de ruissellement engouffrées dans les bétoires, et c'est pourquoi on constate une si grande variation.

Sauf pour les sources qui sortent d'un gisement géologique peu épais (sources issues des terrains tertiaires situés au-dessus de l'argile plastique ou de glaises vertes), toutes les fois que la température d'une eau souterraine varie de plus de 0°,2 à 0°,3, on doit soupçonner une infiltration appréciable d'eau superficielle sur son périmètre. Celui-ci est alors, en partie du moins, situé dans l'étendue de terrains où ces eaux superficielles se perdent.

Ainsi, par exemple, la source de l'Aach, dans le duché de Bade, était, en juillet 1902, de 15°, en hiver elle n'est que de 11°, parce que son périmètre est situé dans une région où se perd une rivière qui, en l'espèce, est le Danube dont les eaux s'engloutissent à Immendingen.

Le raisonnement inverse n'est pas exact, et une source dont la température est invariable n'a pas certainement son périmètre d'alimentation situé en dehors de la zone où s'engouffrent des ruisseaux.

Par exemple, les sources d'Ober Willingen qui proviennent en grande partie de la perte de l'Ilm à 4500 mètres de distance, ne varient pas de plus de 0°,2 de température dans une même année et de plus de 0°,1 après de fortes pluies ; de même Thiem assure que l'eau

de l'Isaar qui pénètre dans la terre avec 17°, en sort à 2 kilomètres plus loin, au delà du Pupplinger Aue, avec seulement 7°,7.

C'est qu'en effet le régime des eaux souterraines est, comme nous l'avons vu, assez compliqué et nous retrouvons aux sources de la Dhuys une situation à peu près identique à celle des sources de l'Ober Willingen et des eaux de l'Isaar. Après les pluies, ces eaux se troublent fortement, mais la température ne varie guère que de 0°,2 à 0°,5, tandis que la source voisine de Champy varie de 3 et 4°. Cette situation, anormale à première vue, peut s'expliquer très facilement quand, en même temps qu'on suit les variations de température, on mesure les variations du degré de minéralisation.

Ainsi, par la comparaison des sources de Pargny et de Champy, on constate après une pluie :

	Variations de	
	Température.	Résistivité électrique.
S. de Pargny...........	0,2	200 ohms.
S. Champy.............	4°,0	3.000 —

La variation de minéralisation se produit par le mélange des eaux de ruissellement, très peu minéralisées, avec celles plus riches en sels qui ont séjourné un temps beaucoup plus long dans le sol. Il est évident, à l'inspection de ces résultats, qu'il y a concordance complète entre les variations de température et de résistivité électrique. Nous ne possédons malheureusement pas les variations des débits de ces deux sources ; on peut toutefois conclure sûrement de ces résultats, que la variation de température est d'autant plus grande qu'il y a plus d'eau superficielle, peu minéralisée, arrivant à la source. Pourquoi une si grande différence dans la façon dont se comportent ces sources, issues d'un même gisement géologique et communiquant avec les eaux superficielles par un assez grand nombre de points d'absorption ? Il faut

admettre que la source de Pargny renferme, sous toute l'étendue de son périmètre, une vaste réserve aquifère que ne possède pas la source de Champy. Au moment des crues il ressort à la source de Pargny des eaux engouffrées dans les bétoires, mélangées à des eaux provenant de la réserve souterraine. A celle de Champy, au contraire, les eaux de la réserve souterraine sont arrêtées par l'arrivée des eaux superficielles qui concourent, pour une grande part, à son alimentation. En hiver, ces dernières sont plus froides et concourent au refroidissement des sources. Plus la réserve souterraine sera grande, moins l'effet des pluies d'hiver se fera sentir; c'est tout probablement pour cela que la température de la source de Pargny subit une si faible variation et reprend aussi rapidement sa valeur initiale de 10°,5.

Près de Dreux se trouve une source, l'Abîme, dont les variations de température sont en relations très étroites avec celles de la rivière La Blaise, qui s'infiltre dans le sol à 1 400 mètres en amont (fig. 64). Les expériences avec le sel marin ayant montré que les eaux de cette source étaient formées, pour plus de moitié, d'eau engouffrée de la rivière, nous avons trouvé par la suite que les variations de sa température étaient plus que moitié moindres des variations de la Blaise. Il y avait donc concordance dans les résultats.

En synthétisant les résultats obtenus, nous avons montré (1) que :

1° La température des sources est d'autant plus constante que les diaclases, servant de passage aux eaux souterraines, sont plus étroites ;

2° Les courbes des températures de la source et des eaux superficielles, obtenues comme il est indiqué sur la figure 64, se coupent toujours aux environs de la même température (celle de la réserve souterraine) quand la

(1) *Bulletin de la Société belge de géologie*, 1906.

source est constituée par des eaux venant les unes de la réserve souterraine, les autres de la rivière engouffrée, mais circulant rapidement à travers des diaclases assez

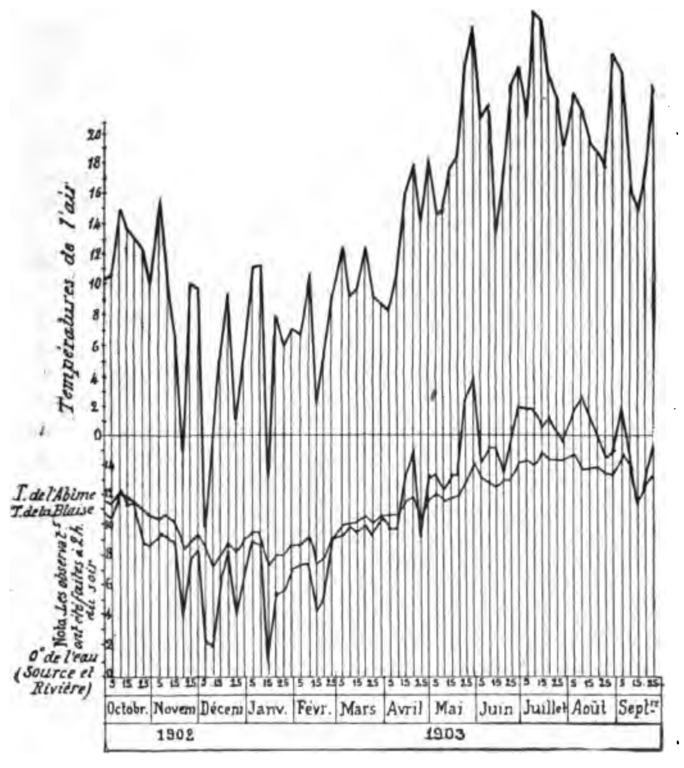


Fig. 64. — Courbes des températures de la rivière La Blaise et de la source de l'Abîme.

grosses et régulières pour n'avoir pas le temps de s'échauffer ou se refroidir (cas de la figure 64) durant son trajet souterrain ;

3° La courbe des températures de la source est

maximum au moment où elle coupe celle des températures de la rivière, lorsque les eaux de la rivière engouffrée contribuent à peu près exclusivement à l'alimentation de la source (cas du Loiret);

4° La courbe des températures de la source se rapprochera d'autant plus d'une ligne droite que le parcours souterrain de ses eaux sera plus long, que la réserve souterraine sera plus importante;

5° En dehors des deux types de sources représentés en 2° et 3°, il y a tous les intermédiaires, mais qu'on rapprochera de l'un ou l'autre de ces types suivant la façon dont les courbes de températures se coupent;

6° Enfin, la température de la source ne varie quelquefois que pendant l'hiver, parce que les eaux superficielles sont plus abondantes. En été, elle demeure constante (cas de l'Avre).

Dans la vallée du Loing on trouve des puits très voisins, dont les uns ont une température qui est celle des sources (12°,2 à 12°,3), tandis qu'à 50 mètres il y en a d'autres dont la température n'est que 10°,5. Enfin, entre ces deux extrêmes il y a tous les intermédiaires.

On admet que dans cette vallée il y a deux courants : l'un à 10°,5, l'autre à 12°,2. Suivant que les puits seront placés près de l'un quelconque de ces courants, les eaux se rapprocheront de 10°,5 ou de 12°,2.

Déjà MM. Martel et Van den Brœck ont montré que, dans la grotte de Han-sur-Lesse, la température des eaux n'est pas partout la même. Le fleuve souterrain, au moment où ils prenaient la température, avait une température de 16°,5.

Dans la salle des Draperies, proche du courant souterrain, la température était de 10°,5 ; enfin dans les parties les plus reculées elle n'était que de 8° à 8°,5. MM. Martel et Van den Brœck admettent que la salle des Draperies reçoit de l'eau seulement lors des crues d'hiver et un peu lors de celles d'été, d'où un réchauffement de 2° sur les eaux

plus éloignées du courant à 8°,5. Pour notre part, nous croyons à un réchauffement lent de la roche par l'eau du courant, réchauffement qui profite à l'eau de la salle des Draperies; c'est le même phénomène, atténué mais semblable à celui trouvé par M. H. Schardt dans le tunnel du Simplon, qui a vu la roche se refroidir par suite de l'arrivée brusque d'eau à basse température.

D'autre part, la température des eaux peut être supérieure dans certaines parties du sol s'il se produit des réactions chimiques, comme cela existe encore dans les filons d'ampelite alunifère.

En résumé, l'étude de la température d'une source, si les variations sont sensibles, permet de connaître son périmètre d'alimentation et de se faire une première idée de l'origine et de la circulation souterraine des eaux qui arrivent à la source.

Toutefois dans les terrains faillés ou fortement plissés comme sous le Simplon, les différences de température des eaux tiennent à des différences dans le mélange des eaux plus ou moins chaudes.

Une telle complication est relativement rare et ne se produit que dans certains terrains assez bouleversés comme les Alpes. La géologie de la contrée permet de prévoir cette complication et d'être très réservé dans les conclusions à donner aux résultats obtenus.

IV

DÉBITS

L'étude des débits a une assez grosse importance dans l'étude d'une source ou d'une région. Étant donnée, par exemple, l'étendue d'un gisement géologique et le débit des sources qui y prennent naissance, on peut savoir si la couche imperméable qui crée le niveau d'eau

souterraine est ou n'est pas complètement perméable.

Les fortes sources qui sortent du mont de Chamblon, lequel n'a qu'une superficie de 5 kilomètres carrés, ne peuvent, à cause de leur très grand débit, avoir comme périmètre exclusif cette colline.

D'après M. Schardt (1), ces eaux déborderaient par-dessus les défauts de la bordure des marnes hauteriviennes qui entourent le mont de Chamblon. Une expérience à la fluorescéine faite à l'entonnoir de Baulmes, au bord du Purbeckien, a montré la réalité de cette hypothèse.

D'autre part, les crues de ces sources correspondent avec la fonte des neiges du Jura, tandis que depuis longtemps le mont de Chamblon en est privé. L'étude des débits d'une source permet donc, de même que la composition chimique et la température, de savoir si par les éboulis ou des fissures elle ne reçoit pas d'eau d'une nappe supérieure.

Dans la région des Puys on trouve des sources sortant des coulées de lave mais ayant des régimes différents :

Les unes ont un grand débit en hiver et faible en été, les autres ont un plus grand débit en été qu'en hiver.

Pour ces dernières M. Baldit a montré qu'elles étaient renforcées par les irrigations des prairies supérieures qui se trouvaient sur leur périmètre d'alimentation.

Quelques sources ont un régime assez constant. Ce sont celles dont le bassin d'alimentation est vaste.

De l'étude géologique du périmètre d'un groupe de sources, de l'importance de leur débit et de la perméabilité de la surface du sol, on peut évaluer la proportion d'eau de pluie dont les nappes profitent et en conclure, comme le fait M. Imbeaux pour les grosses sources de Pierrepont et de Mairy, pour celle de la Rochotte près de Toul, que la totalité des eaux infiltrées ne ressort pas aux sources

(1) Schardt, *Genève. Archives des Sc. physiques et naturelles*, p. 45, t. XVIII, 7-9, 1904.

du gisement géologique et, dans le cas dont il s'est occupé, est en partie perdue pour la nappe infrabathonienne au profit de la nappe bajocienne. Celle-ci les drainera soit par des failles, soit par une solution de continuité dans les couches imperméables qui, comme on le sait, vont en diminuant d'épaisseur vers le sud et peuvent être insuffisantes pour arrêter l'action des fissures.

Nous signalerons encore à titre d'exemple, qu'il existe sur la rive droite de l'Eure un gisement assez important de terrains tertiaires (calcaire de Saint-Ouen, calcaire grossier) reposant sur une couche imperméable qui, dans l'espèce, est l'argile plastique. Les sources qui prennent naissance dans ces terrains sont de très faible puissance, nullement en rapport avec l'étendue du gisement géologique parce que l'argile sous-jacente n'est pas complètement imperméable.

Cette remarque a une grande importance pour l'hydrologie de cette région où il faudra descendre au-dessous de cette couche, dans la craie pour avoir de l'eau en assez grande abondance.

Tout de suite cette solution ne paraîtra guère avantageuse pour ceux qui seraient tentés d'installer une industrie agricole dans ces parages. Il leur faudra aller prendre l'eau, dans une partie plus profonde où, d'après la constitution géologique, elle ne peut être jaillissante. Il en résultera une augmentation sensible des frais de relèvement.

Dans les terrains sablonneux, dans les terrains d'alluvions ou encore dans les terrains fissurés d'une façon uniforme avec de très fines fissures, le débit des sources varie très peu (au maximum 10 à 20 p. 100 du débit minimum).

Au contraire dans les terrains très fissurés, là où les eaux de ruissellement viennent rapidement rejoindre les sources ou les eaux de la réserve souterraine, les débits augmentent très rapidement surtout en hiver.

C'est par ce moyen que Dausse a été amené à énoncer la loi suivante : Les pluies d'hiver sont les seules qui profitent à la nappe. Les pluies d'été, à cause de l'évaporation due à la chaleur et aux plantes, sont sans influence sur les sources.

Depuis plusieurs années nous l'avons vérifiée aux sources captées par la Ville de Paris.

Par conséquent, toutes les fois que le débit d'une source variera d'une façon anormale il faudra rechercher les endroits où des faits, intéressant le débit des sources, ont pu se produire pendant la période incriminée. S'ils ne se sont produits qu'en un point assez bien déterminé, on en déduira que celui-ci se trouve sur le périmètre d'alimentation cherché.

Voici un exemple de cette application :

Il existe, à 8 kilomètres en amont de Louviers, un certain nombre de sources, issues de la craie. Ces sources se divisent en deux groupes : les unes, ayant une résistivité voisine de 2000 ohms, forment les sources de Fontaine-sous-Jouy. Les autres, dont la résistivité est de 2 200 ohms, constituent le groupe de Cailly.

Les premières sont beaucoup plus magnésiennes que les secondes, c'est pourquoi il y avait lieu d'assigner à chacune d'elles un périmètre différent.

Étant donnée la position de ces sources, surtout celles de Cailly, on en déduisit facilement, au moyen des courbes des niveaux piézométriques, que le périmètre se trouvait sous le plateau compris entre l'Iton et l'Eure. L'étude du débit des sources de Cailly nous a permis de connaître au moins un point important de son périmètre.

Le groupe de Fontaine-sur-Jouy avait un débit qui augmentait au moment des pluies, mais baissait assez rapidement.

Au contraire le débit des sources de Cailly, s'il augmentait au moment des pluies abondantes, était encore en croissance à la fin du mois de mars et se maintenait à

peu près constant jusqu'en juin ; à la fin de juillet jusqu'au commencement de septembre, il augmentait encore légèrement pour rebaisser ensuite.

Une source dont les débits ne varient pas avec régularité, pour laquelle, à certaines époques déterminées comme en juillet, on trouve des baisses brusques, et qui augmente tous les ans régulièrement pendant la saison d'été (juillet à septembre), doit recevoir, en certains points de son périmètre, des eaux superficielles qui seules peuvent contribuer à l'augmentation de ces débits. D'après la loi de Dausse, en saison d'été, ces eaux superficielles ne peuvent être des eaux de pluie. Ce ne peut être que des eaux de rivières qui, pour une cause spéciale, viennent s'infiltrer dans le sol aux mêmes époques de l'année.

Si nous étions au voisinage d'une montagne nous pourrions soupçonner les eaux provenant de la fonte des neiges. Mais ce n'est pas ici le cas et nous fûmes amenés à soupçonner les irrigations qui seules, dans cette région, pouvaient fournir régulièrement au sous-sol un complément d'eau en été.

Celles-ci s'étendent de fin mars à juin, de fin juillet à septembre, époques pendant lesquelles nous constations une augmentation de débit aux sources de Cailly. Le périmètre de ces sources comprenait très probablement au moins un endroit où se faisaient des irrigations. C'est ce qu'il fut facile de vérifier. Les irrigations avaient lieu dans la vallée de l'Iton et avaient pour effet d'augmenter la hauteur de l'eau dans les puits creusés dans la craie principalement à Évreux.

D'autre part, l'étude de la conductibilité électrique et des courbes de niveaux piézométriques, plaçait le périmètre de ces sources dans la vallée de l'Iton et même sous Évreux. Les conclusions se vérifiaient de ces trois méthodes, elles étaient concordantes.

Pour acquérir la certitude absolue, nous avons décidé

de tenter, avec beaucoup de chances de succès, deux expériences avec la fluorescéine qui ont montré, en effet, qu'Évreux est bâtie sur le périmètre d'alimentation des sources de Cailly (1).

Les variations du débit des eaux engouffrées peuvent être artificielles, ce qui permet d'étudier quelquefois les variations de débit de la source qui reçoit ces eaux infiltrées.

En répétant plusieurs fois l'opération on obtient ainsi la certitude de la communication de la rivière avec la source.

Nous avons vu employer cette méthode par M. Besnard à Dreux, le professeur Bunck l'a appliquée au cours d'eau du Karst.

Comme autre cause de variations des débits, nous citerons l'observation de MM. Delage et Mourgues, qui, étudiant le bassin de la source du Lez, ont montré la relation du débit de cette source avec deux orages de 1904 tombés sur leur périmètre d'alimentation et se déclarant après six semaines de sécheresse.

La pluie a eu une répercussion sur les sources au bout de sept heures.

Nous-mêmes, à la Dhuys et à la Vanne, nous nous sommes souvent servis avantageusement de cette méthode.

La variation des débits est souvent plus sensible que celle de la température.

Après les pluies qui profitent à la nappe, la température ne varie guère à la source de la Dhuys que de 0°,20, tandis que le débit augmente de moitié environ.

L'étude de la température des sources fait intervenir l'influence plus ou moins considérable de la réserve

(1) Évreux est placé également dans un endroit où la vallée de l'Iton change de direction. Les eaux circulant souterrainement dans la vallée, en amont de la ville, venaient buter contre le massif crayeux, d'où possibilité pour elles de s'engager dessous lui pour aller rejoindre la vallée d'Eure.

d'eau susceptible d'alimenter les sources en absence des pluies.

Pour les débits MM. Pochet et Maillet ont traité cette question d'une façon très mathématique. Ce dernier surtout s'est servi de résultats tout à fait théoriques dus à M. Boussinesq. Ces questions ne peuvent être abordées ici. Il y a en outre des divergences telles dans les résultats obtenus d'une part par M. Pochet, d'autre part par M. Maillet, qu'on se demande si leurs points de départ ne sont pas insuffisants (1).

En résumé, pour déterminer le périmètre d'alimentation d'une source ou même d'un puits dans lequel on pomperait continuellement pendant un long espace de temps, on doit s'adresser à la carte géologique pour déterminer :

1° la couche géologique où l'eau circule,

2° l'inclinaison des couches,

3° leur épaisseur,

4° leurs points d'affleurement et leur étendue.

On se transporte ensuite sur le terrain pour y constater le degré de perméabilité de la couche géologique, de l'importance des ruissellements ; on détermine ainsi le coefficient du profit que les nappes souterraines retirent des pluies.

On note l'emplacement des sources (2) et des puits du périmètre probable déterminé par l'affleurement des couches imperméables limitant les sources en profondeur, les rivières qui circulent sur ce périmètre et leurs points d'absorption s'il y en a.

L'allure des nappes multiples et leur direction géné-

(1) Les variations de la pression barométrique influent sur le débit des sources. D'après King (*Nineteenth annual Report of the U. S. Geological Survey*, part. II, 1899), les variations pourraient dépasser quelquefois 10 p. 100. Des faits du même genre ont été signalés par Otto Lueger et Latham ; aux sources de l'Avre on constate des faits analogues.

(2) Nous espérons montrer prochainement comment on peut encore, par la radioactivité des sources, arriver à déterminer leur périmètre d'alimentation.

rale d'écoulement est donnée par les courbes de niveau piézométrique, on divise le périmètre en zones au moyen de la conductibilité électrique des sources et des puits non contaminés. On mesure à différents intervalles la conductibilité des sources, le débit et la température de celles-ci et des rivières qui se perdent.

On fait ensuite plusieurs expériences à la fluorescéine et pour interpréter leurs résultats et ceux des recherches précédentes on se sert des principes énoncés plus haut. Les limites de ces périmètres sont obtenues par application des deuxième et troisième principes en tenant compte des réserves du cinquième principe relatif aux variations de régime. Le quatrième principe a pour but, soit d'étendre le périmètre plus vers l'amont, soit d'indiquer que des eaux se perdent dans une couche géologique inférieure, et il faut rechercher les moyens d'y remédier.

En possession de ces divers renseignements on arrive à se faire une idée très suffisante de la circulation souterraine des eaux qu'on se propose d'utiliser. On est capable, dans de nombreux cas, d'indiquer les quantités d'eau qu'on peut s'attendre à rencontrer, les endroits où elles seront les plus abondantes, enfin leur qualité. Ce sont ces problèmes que nous allons aborder.

V

DES RESSOURCES EN EAU.
GÉNÉRALITÉS ET HISTORIQUE

Les études, poursuivies en vue de rechercher le périmètre d'alimentation d'une source ou d'un groupe de sources, ont une importance très grande quand il s'agit de capter une eau, en un point quelconque de ce périmètre. Nous avons déjà signalé en son temps l'importance de ces études, mais il est évident que celles-ci ne

peuvent être poursuivies que là où on désire s'assurer d'une grande quantité d'eau. Il serait trop onéreux de faire une étude complète de ce genre pour obtenir l'eau simplement nécessaire à une très petite exploitation agricole; quand au fur et à mesure du développement des besoins en eau il en faut capter de plus grandes quantités, il est alors utile de savoir au préalable l'endroit à peu près exact où on trouvera ces ressources d'eau.

Les premières études et les exemples que nous avons donnés ont montré comment se faisait la circulation souterraine. Elles nous serviront à mieux faire comprendre d'autres méthodes empiriques, ne nécessitant aucune expérience, et qui peuvent rendre très souvent de très grands services dans le cas de petites exploitations agricoles.

Depuis les temps les plus anciens, on s'est ingénié à trouver des méthodes pour déterminer les endroits riches en eaux souterraines. Les Romains, grands consommateurs de ce liquide pour leurs multiples besoins, s'étaient ingéniés à indiquer quelques moyens empiriques. Voici ce que Vitruve et Pline (1) le naturaliste écrivaient à ce sujet :

« Pour connaître les lieux où il y a de l'eau, il faut, un peu avant le lever du soleil, se coucher sur le ventre, ayant le menton appuyé sur la terre où l'on cherche de l'eau et regarder le long de la campagne ; car le menton étant ainsi affleuré, la vue ne s'élèvera pas plus haut qu'il est nécessaire ; mais assurément elle s'étendra au niveau, et si l'on voit en quelque endroit, une vapeur humide s'élever en ondoyant, il y faudra fouiller, car cela n'arrive point aux lieux qui sont sans eau.

« De plus, quand on cherche de l'eau, il faut examiner la qualité de la terre, parce qu'il y a certains lieux où elle se trouve plus en abondance ; car l'eau que l'on

(1) Vitruve, Les 10 livres d'architecture, traduction Perrault, livre VIII, chap. I, Paris, 1684.

trouve dans la craie n'est jamais abondante ni de bon goût. Parmi le sable mouvant, elle est en petite quantité même bourbeuse et désagréable, si on la trouve après avoir fouillé profondément.

« Dans la terre noire, elle est meilleure quand elle s'y amasse de pluies qui tombent pendant l'hiver et qui, ayant traversé la terre, s'arrêtent aux lieux solides et non spongieux; celle qui naît dans une terre sablonneuse pareille à celle qui est au bord des rivières est aussi fort bonne, mais la quantité en est médiocre, et les veines n'en sont point certaines. Elles sont plus certaines et assez bonnes dans le sablon mâle, dans le gravier et dans le carboucle. Dans la pierre rouge, elles sont bonnes aussi et abondantes, pourvu qu'elles ne s'échappent point par les jointures des pierres. Au pied des montagnes, parmi les rochers et les cailloux, elles sont plus abondantes, plus froides et plus saines. Dans les vallées, elles sont salées, pesantes, tièdes et peu agréables; si ce n'est qu'elles viennent des montagnes et qu'elles soient conduites sous terre jusque dans ces lieux, ou que l'ombre des arbres leur donne la douceur agréable que l'on remarque en celles qui sortent du pied des montagnes.

« Outre ce qui a été dit, il y a d'autres marques pour connaître les lieux où l'on peut trouver des eaux, savoir : lorsqu'il y a des petits joncs, des saules qui sont venus d'eux-mêmes, des aunes, des vitex, des roseaux, du lierre et de toutes les autres plantes qui ne naissent et ne se nourrissent qu'aux lieux où il y a de l'eau. Il ne faut pourtant pas se fier à ces plantes, si on les voit dans les marais qui, étant des lieux plus bas que le reste de la campagne, reçoivent et amassent les eaux de la pluie qui tombe dans les champs d'alentour et durant l'hiver, et se conservent assez longtemps mais si dans les lieux qui ne sont point des marais, ces plantes se trouvent naturellement, et sans y avoir été mises, on peut y chercher de l'eau.

« Que si ces marques défaillent, on pourrait faire cette épreuve : Ayant creusé la terre de la largeur de 3 pieds et de la profondeur de 5 au moins, on posera au fond, lorsque le soleil se couche, un vase d'airain ou de plomb, ou un bassin, car il n'importe ; ce vase étant frotté d'huile par dedans et renversé, on couvrira la fosse avec des cannes et des feuilles, et ensuite avec de la terre. Si le lendemain on trouve des gouttes d'eau attachées au dedans du vase, cela signifie que ce lieu a de l'eau.

« Ou bien on mettra un vase en terre non cuite dans cette fosse que l'on couvrira comme il a été dit : s'il y a de l'eau dans ce lieu-là, le vase sera moite et détrempé par l'humidité.

« Si on laisse aussi dans cette fosse de la laine et que le lendemain il en coule de l'eau, ce sera une marque que ce lieu en a beaucoup.

« Si l'on enferme une lampe pleine d'huile et allumée, et que le lendemain on ne la trouve pas tout à fait épuisée et que l'huile et la mèche ne soient pas entièrement consumées, ou même que la lampe soit mouillée, cela signifiera qu'il y a de l'eau sous ce lieu, parce que la chaleur douce attire l'humidité.

« On peut faire aussi une autre épreuve, en allumant du feu en ce lieu ; car si après avoir beaucoup échauffé la terre, il s'élève une vapeur épaisse, c'est un signe qu'il y a de l'eau.

« Quand on aura fait toutes ces épreuves et que les signes que nous venons de dire se rencontreront en quelque lieu, il le faudra creuser en manière de puits. Si l'on y trouve une source, il faudra faire plusieurs autres puits tout alentour, et les joindre ensemble par des conduits sous terre ; mais il faut savoir que c'est principalement à la pente des montagnes qui regardent le septentrion qu'il faut chercher les eaux, et que c'est là qu'elles se trouvent meilleures, plus saines et plus abondantes : parce que ces lieux-là ne sont pas exposés

au soleil, étant couverts d'arbres fort épais et la descente de la montagne se faisant ombre à elle-même, ce qui fait que les rayons du soleil, qu'elle reçoit obliquement, ne sont pas capables de dessécher la terre.

« C'est aussi dans les lieux qui sont au haut des montagnes que l'eau des puits s'amasse, et que les arbres qui croissent en grand nombre y conservent la neige fort longtemps, laquelle, se fondant peu à peu, s'écoule insensiblement par les veines de la terre : et c'est cette eau qui, étant parvenue au pied des montagnes, y produit des fontaines. Mais celles qui sortent du fond des vallées ne peuvent pas avoir beaucoup d'eau, et quand même il y en aurait en abondance, elle ne saurait être bonne, parce que le soleil qui échauffe les plaines, sans qu'aucun ombrage l'en empêche, consume et épuise toute l'humeur, ou du moins, il en tire ce qui est de plus léger, de plus pur, de plus salubre, qui se dissipe dans la vaste étendue de l'air et ne laisse que les parties les plus pesantes, les plus crues et les plus désagréables pour les fontaines des campagnes. »

Pline (1), en plus des observations précédentes, ajoute :

« La terre indique la présence des eaux quand elle est semée de taches soit blanches, soit vertes. Rarement des eaux vives et permanentes ruissellent sur une terre noire, la terre à potier enlève toute espérance d'en trouver. Ceux qui font les puits cessent de creuser, lorsque, en observant les diverses couches qui sont comme les pellicules de la terre, ils arrivent de la terre noire à la verte. »

Depuis longtemps, dans les campagnes, on se sert de la baguette de coudrier qu'un spécialiste, connu sous le nom de sourcier, emploie pour la recherche des eaux souterraines.

(1) Pline, *Histoire naturelle*, traduction par Ajanin Grandsagne. Paris, Panckoucke, 1829-1833.

Cette baguette, en forme de V, tenue d'une façon spéciale, doit tourner dans les mains de l'opérateur quand celui-ci passe au-dessus de l'eau.

Ce procédé, qui ne repose sur aucune notion scientifique, ne peut guère être préconisé avant d'avoir été l'objet d'études approfondies, faites avec toute la prudence et la méthode scientifique. M. le Dr Vigen vient de faire paraître une brochure sur les aptitudes spéciales des sourciers. Malgré les nombreux exemples qu'ils donnent sur leurs succès, ceux-ci peuvent s'interpréter sans faire appel à une force inconnue.

C'est, au fond, depuis l'abbé Paramelle que la recherche scientifique des eaux souterraines a pris une certaine importance. Les travaux de Belgrand, Daubrée, Buras, Dana, Philips, Martel, Goulet, Van den Broeck, etc., ont démontré certains points obscurs de la circulation souterraine et rendu plus scientifiques et plus précises les méthodes de recherches des eaux souterraines.

VI

RECHERCHES D'EAU. — SIGNES EXTÉRIEURS

La grande supériorité des personnes qui font de très nombreuses recherches d'eau souterraine est de voir immédiatement, par l'habitude qu'elles ont de ces recherches, les signes extérieurs qui leur permettent de prévoir les endroits où on peut trouver de l'eau. C'est pourquoi les sourciers réussissent si souvent avec leur procédé de la baguette de coudrier, quand, en fait, ce sont surtout ces signes extérieurs qui les guident.

Auscher (page 158) évalue à 6 ces signes extérieurs, savoir :

1° Bruits et bruissements souterrains;

1° Fonte plus rapide de la neige en des endroits humides;



3° Buées matinales et vols d'insectes ;

4° Végétation des terrains humides ;

5° Faune des couches souterraines voisines de la surface du sol ;

6° Aspect et flore des terrains perméables et des terrains imperméables qui permettent facilement de connaître les endroits où se produisent ces affleurements.

Bruits et bruissements souterrains. — Les courants souterrains dans les sols fissurés, produisent quelquefois certains bruits qu'il est possible de percevoir à la surface du sol. Ces bruits sont généralement dus à une chute d'eau souterraine. Ils ne se produisent donc pas partout où il y a des courants souterrains, on les constate principalement dans les terrains où il y a alternance de roches très dures à côté de roches très tendres, comme par exemple dans l'Urgonnien ou bien dans les grès de Fontainebleau (Recloses). C'est donc un signe qui n'est utile que s'il est positif, son absence ne devant pas être considérée comme une cause probable d'insuccès.

M. le baron de la Fontaine a eu souvent l'occasion de découvrir à l'audition des courants souterrains dans la région du Geer, dans la craie au-dessus des *tawes*.

Comme autre exemple de bruit souterrain provoqué par un courant, nous citerons celui entendu sur le versant ouest d'un village arabe, del El Mehdi (province d'Oran), qui semble être dû à l'existence de la rivère souterraine déjà trouvée par le général de Lamoricière.

M. Viré, dans la grotte de Betharram (Pyrénées), a entendu le bruit d'un courant qui semble alimenter les deux émergences amont de la fontaine de Mélac.

Mais quelquefois le bruit peut être dû à de forts courants d'air, comme on en a trouvé dans la caverne de la Puebla d'Alborton en Aragon.

D'Alembert, dans son encyclopédie, indique le moyen de percevoir ces bruits : Le soir tard ou le matin de bonne

heure, quand l'activité humaine s'est considérablement ralentie, on creuse un trou en terre, on fabrique avec du papier un entonnoir et, en posant la grande base sur le sol, on introduit la petite ouverture dans l'oreille. Les chutes d'eau ou bien encore un courant impétueux font entendre quelques bruits dans ce cornet.

On recommande également ces instruments appelés stéthoscopes, qui servent aux médecins pour ausculter leurs malades. On a recommandé le microphone, malheureusement ce procédé que nous avons eu l'occasion d'essayer, ne nous a jamais donné de résultats satisfaisants. Il vaut mieux employer les procédés plus grossiers signalés en premier lieu. Nous avons dit qu'un courant souterrain ne s'entendait que s'il y avait chute. On peut toutefois l'entendre, sans qu'il y ait chute, avec un peu d'habitude quand il est très près de l'endroit où l'on se trouve.

La plupart des puisatiers ignorent généralement ce détail et ne font, à leur grand désavantage, jamais usage de cette méthode.

Fonte plus rapide de la neige en des endroits humides. — Nous avons vu que la température des eaux souterraines pouvait être considérée comme mesurant, avec une grossière approximation, la moyenne de température du lieu considéré.

En hiver, la partie superficielle du sol rayonne une assez grande partie de sa chaleur dans l'atmosphère et se refroidit. Les courants souterrains, qui fournissent constamment des eaux plus chaudes que l'air extérieur, constituent, pour le sol, une source supplémentaire de chaleur. Tout le long de leurs parcours, le sol est toujours plus chaud qu'ailleurs et la neige qui y tombe fond beaucoup plus vite.

Il est évident que pour apprécier ces points il faut envisager au préalable l'épaisseur plus ou moins uniforme de cette neige par suite de l'accumulation due aux vents.

Ce procédé comporte quelques causes d'erreur, comme la non uniformité de l'épaisseur de la couche de neige, l'exposition au sud c'est-à-dire au soleil, ou bien aux vents chauds, causes qui facilitent la fonte des neiges.

Les arbres ne favorisent pas celle-ci a cause de l'ombre qu'ils portent, s'ils sont isolés. Avant donc de conclure qu'il existe de l'eau là où la fonte des neiges est le plus rapide, il faudra éviter les causes d'erreur que nous venons d'indiquer et ne comparer que des endroits tout à fait semblables.

Buées matinales et vols d'insectes. — Partout où il y a de l'eau, l'air qui s'échappe du sol est humide. Son humidité sera d'autant plus grande que l'eau est moins profonde. Vitruve indique déjà ce signe extérieur et recommande d'opérer le matin parce que la température de l'air étant le plus faible, c'est à ce moment qu'on voit plus facilement les buées formées par la condensation de la vapeur d'eau souterraine à la surface du sol.

Comme Vitruve l'avait fort bien observé, ces buées sont opaques et restent à la surface du sol. C'est pourquoi il recommande de poser son menton sur le sol et de ne pas promener son regard autrement qu'en regardant le sol à la hauteur des yeux.

Cette buée, qui est permanente, attire les insectes et principalement les moucherons. Dans les endroits où il y a des eaux stagnantes, comme par exemple dans les tourbières ou les marais, on retrouve ces signes extérieurs.

Mais on sait fort bien que ces terrains regorgent d'eau et pour les utiliser il suffit d'un drainage plus ou moins profond pour en récolter une quantité suffisante.

Végétation des terrains humides. — La présence, dans le sol, d'eau en plus ou moins grande abondance favorise la végétation d'un certain nombre d'espèces végétales, à la condition toutefois que cette eau ne soit pas trop profonde. On peut ainsi, de la sorte, prévoir

l'emplacement d'une nappe locale, généralement de peu d'importance, mais qui peut rendre beaucoup de services pour l'établissement d'une ferme ou l'approvisionnement d'une exploitation déjà existante.

Comme M. Auscher le préconise, il faut s'assurer, au préalable, que le terrain par lui-même n'est pas imperméable ou peu perméable. Dans les tourbières, les marais et les terrains argileux, on rencontre un certain nombre des espèces que nous allons indiquer. Les eaux de ces derniers terrains ne sont pas à proprement parler des eaux souterraines; en tout cas pour les capter, il faut opérer par drainage et non par puits.

Quoi qu'il en soit, il est toujours facile de faire la destination entre un terrain tourbeux et celui qui ne l'est pas. L'attention ne doit se porter sur la végétation qu'après s'être assuré du terrain sur lequel on se trouve.

Dans les régions tempérées, l'eau souterraine se manifeste par la présence de l'aune, de la cardamine, des carex, des colchiques, des fétuques, des joncs, de la menthe, des mousses, de la renoncule, des roseaux, des saules, des peupliers, de l'hépatique des fontaines, de la ciguë aquatique, de l'hiéble sureau, de la lysimarque monnoyère, du laurier rose, des vers de terre, des limaces et des crapauds.

Ces quelques caractères extérieurs permettent de connaître les endroits où on peut espérer avoir de l'eau. Malheureusement, comme pour toutes les méthodes préconisées, aucune n'est infaillible. Les signes extérieurs ne sont utiles que si la nappe d'eau est assez près du sol.

Caractères géographiques. — Il existe actuellement pour tous les pays, des cartes géologiques, suffisamment détaillées et expliquées pour permettre à chacun de se rendre compte si le terrain sur lequel on désire creuser un puits est perméable ou imperméable, sableux, calcaire, granitique, etc. Toutefois, il importe très souvent de connaître autrement que par ces cartes la nature du sol.

Dans les terrains imperméables, il faut distinguer ceux qui, comme les granits, sont formés des roches très peu fissurées et, à cause de leur compacité, presque absolument imperméables aux eaux, des autres qui doivent leur imperméabilité aux argiles qui les composent. Grâce à la présence d'une petite couche d'alluvions ou d'éléments détritiques, on peut, dans ces derniers terrains, en creusant un puits, avoir au moins de l'eau suffisante pour une exploitation agricole de petite importance. Pour avoir beaucoup d'eau, il faut s'adresser aux terrains perméables. Or, rien que l'aspect permet de connaître, à première vue, à quels genres de terrains on a affaire.

Ainsi, les granits ont la forme de mamelons très petits, dénudés et sans aucune végétation. C'est dans les parties les plus basses, là où se sont accumulés des produits de la décomposition de ces roches, riches en silice, pauvres en chaux, qu'on trouve quelques végétaux. Les espèces qui poussent dans ces terrains sont désignées sous le nom de *plantes silicicoles.*

Là où se trouvent des roches imperméables, et le granit est du nombre, le pays est creusé de nombreuses petites vallées avec beaucoup de petits ruisseaux de très faible importance.

Comme aspect, les régions des trachytes, des porphyres, des gneiss et des schistes se ressemblent beaucoup, parce qu'elles sont imperméables. Les trachytes forment des dômes plus arrondis et plus saillants que ceux des granits, les porphyres donnent des roches pointues avec de nombreuses échancrures, enfin les gneiss, les schistes et les quartzites sont des roches à arêtes saillantes.

Les plantes silicicoles sont le châtaigner, le chêne-liège, les pins maritimes, les ajoncs, l'arnica de montagne, la bruyère, la digitale pourprée, le genêt à balai, les myrtilles. Dans les terres très meubles et perméables, qui constituent les bases des terrains de décomposition,

des roches cristallophyliennes, la valeur agricole en est généralement très pauvre. Les cultures qu'on peut y faire sont représentées par le seigle, l'avoine et la pomme de terre.

Les autres terrains imperméables, comme les argiles, reposent généralement sur des terrains perméables ; elles en prennent la forme. Toutefois on y constate de nombreuses vallées à bords saillants, et de très faible largeur. Généralement, dans les endroits où la vallée a été élargie sous l'influence des érosions d'une rivière importante, on délimite assez bien la ligne d'affleurement entre la roche perméable inférieure et la couche argileuse. La pente du terrain inférieur et perméable, sauf pour les sables et les grès, et très douce. Au-dessus, la couche argileuse a une pente un peu plus forte qui tranche sur la première.

La présence de l'argile se manifeste immédiatement par la présence des peupliers, des aulnes et de loin par l'aspect spécial de cette végétation.

Les terrains sableux ont une pente beaucoup plus accentuée que l'argile. Ils renferment quelquefois des grès formant des colonnes ou des cônes dénudés. D'autres fois, le grès constitue une couche sédimentaire assez uniforme, dont la pente est encore plus accentuée que celle des terrains sableux.

La flore des terrains gréseux n'est pas exclusivement silicicole. Les grès renferment en effet une petite dose de chaux qui favorise le développement de plantes également calcicoles.

Les terrains calcaires sont des roches essentiellement perméables et très répandues, parcourus par très peu de vallées, où circulent des ruisseaux d'une certaine importance, sauf où il y a des pertes d'eau dans le sol.

Les vallées de ces terrains sont le plus souvent profondes, mais on en trouve également de très peu accentuées. Ce qui caractérise le terrain calcaire c'est la

forme de dômes, lesquels sont couverts de cultures généralement assez riches.

Sur le bord des vallées assez profondes, on constate le dispositif en gradins dû à la rupture des strates qui viennent en affleurement.

Les terrains les plus riches de ces régions calcaires sont ceux qu'on trouve dans les vallées, parce qu'ils sont constitués par les produits de décomposition de la roche qui sont très riches en principes fertilisants.

Les plantes calcicoles sont le buis, le chêne, le noyer, l'olivier et quelques genres de pins, comme le pin d'Alep, le pin Laricio. On y rencontre le chardon, l'ellébore fétide, la gentiane, le muscaris, le pied d'alouette.

Dans les terrains calcaires, on y cultive le blé, l'avoine, l'orge, la betterave, là où la terre superficielle est meuble et suffisamment profonde.

Les endroits où la partie meuble est peu importante, peuvent encore donner de belles récoltes de raisins. Dans l'Yonne, la Côte-d'Or, la vallée du Rhône les plus beaux vignobles sont en terrains calcaires.

VII

RECHERCHES D'EAU.
CARACTÈRES GÉOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

Quand on veut creuser un simple puits pour sa consommation personnelle, il est souvent inutile de faire une étude très approfondie de la région. Il suffit d'en connaître la géologie et la topographie, et on s'aidera des méthodes qui seront préconisées plus loin. Mais là, au contraire, où on sait par expérience que la recherche de l'eau est pleine d'aléas, il faut subordonner les études au volume d'eau qu'on recherche.

Les signes extérieurs examinés, on délimite plus ou

moins le périmètre d'alimentation des eaux souterraines qu'on se propose de prendre. Ce que nous avons dit précédemment nous dispensera ici d'entrer dans de trop longs développements. A la page 197, nous avons indiqué par ordre les diverses recherches à entreprendre à cet effet. Plus ces études seront détaillées, plus on aura de chances de trouver de l'eau en abondance.

En règle générale, c'est dans les endroits où il pleut beaucoup qu'on doit trouver le plus d'eau. Aussi la montagne offre plus de ressources souterraines que la plaine. Mais, dans un même gisement, l'eau ne se trouve pas partout en abondance.

Les premiers terrains que nous envisagerons sont les terrains perméables en petit. Ils renferment de l'eau, parce qu'ils sont limités à leur partie inférieure par une couche argileuse imperméable. Nous considérerons trois cas :

Premier cas : Les terrains très homogènes ;

Deuxième cas : Les terrains dans lesquels on trouve des intercalations d'argiles qui forment des petites nappes locales ;

Troisième cas : Les terrains d'alluvions et les éboulis.

Puis viendront les terrains perméables en grand qui renferment de l'eau soit à la base du terrain sis immédiatement au-dessus de la couche imperméable, soit par circulation à travers des fissures formant des canaux.

Nous envisagerons quatre cas :

Quatrième cas : Les terrains perméables, en grand mais homogènes ;

Cinquième cas : Les terrains homogènes perméables en grand avec intercalations argileuses formant des nappes locales ;

Sixième cas : Les terrains hétérogènes avec nappes localisées, courants souterrains, etc. ;

Septième cas : Les terrains plissés, fortement redressés et faillés.

Enfin, à part, formant le huitième cas, les nappes artésiennes, proprement dites.

Premier cas : Terrain perméable en petit reposant sur un terrain imperméable. — La topographie d'un plateau de ce genre est facile à connaître. On peut, en consultant une carte d'État-Major, connaître l'inclinaison des pentes. Dans un plateau de très faible étendue la topographie peut être très régulière et représentée par un mamelon. La recherche des eaux est dans ce cas très facile, et aucun point particulier n'est susceptible de manquer d'eau en creusant suffisamment profond. Mais la circulation de l'eau dans les sables est excessivement lente. Pour satisfaire à l'alimentation d'industries agricoles qui, comme la brasserie ou la laiterie, ne réclament de l'eau qu'à certaines heures de la journée, il faut pouvoir compter sur un débit d'eau suffisant pour alimenter les pompes, sans que le puits tarisse. Il ne faudra donc pas le creuser au bord de l'affleurement, mais principalement aux environs de la ligne de faîte. On le descendra assez profond dans la nappe souterraine, de façon à pouvoir pomper le plus d'eau possible. Au contraire, dans le cas où on désirerait simplement un puits pour l'alimentatien d'une ferme, l'économie exigera que celui-ci soit creusé aux environs de l'affleurement.

La régularité de l'affleurement est très rare. Les courbes de niveaux qui relient entre eux tous les points ayant même altitude sont généralement allongées dans une direction (fig. 65). La plus grande pente AC est celle suivant laquelle les eaux souterraines seront les plus abondantes, parce que généralement la couche imper-

méable est inclinée également dans le sens de cette ligne de plus grande pente. Mais lorsque la pente de la couche imperméable est dirigée suivant la ligne AB, différente de AC, la zone des eaux les plus abondantes, si on ne considère que la moitié du mamelon, au sud de AB, occupe l'espace compris entre la diagonale AD et la ligne AB.

L'importance du débit de ces eaux dépend, bien entendu, de l'étendue du périmètre d'alimentation. Plus le gisement géologique perméable est étendu, plus on aura d'eau à sa disposition. Mais il ne faudra pas espérer prendre à la

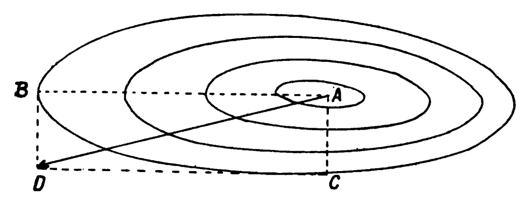


Fig. 65. — Recherche d'eau sur une butte de terrains perméables en petit.

nappe plus d'eau qu'elle ne peut en fournir dans une année. La puissance de la nappe est obtenue en additionnant le débit annuel des sources et celui des puits servant à l'alimentation des exploitations déjà existantes occupant le même gisement géologique.

Comme nous l'avons déjà dit plus haut (p. 63), on doit toujours se méfier de l'imperméabilité de la couche imperméable. Lorsque l'affleurement ne donne pas lieu à quelques sources ou à un marais sur son bord, on n'a pas lieu d'espérer pouvoir puiser dans la nappe un trop grand volume d'eau sans craindre de l'appauvrir. Toutefois nous avons vu des prises d'eau donnant jusqu'à deux litres à la seconde dans des terrains de ce genre et dont le périmètre était environ de cent hectares. C'était un maximum de débit qu'il n'aurait pas fallu dépasser.

Au lieu de considérer un seul mamelon, on peut en envisager deux. La figure 66 représente le cas d'un affleurement composé d'une vallée en son centre avec

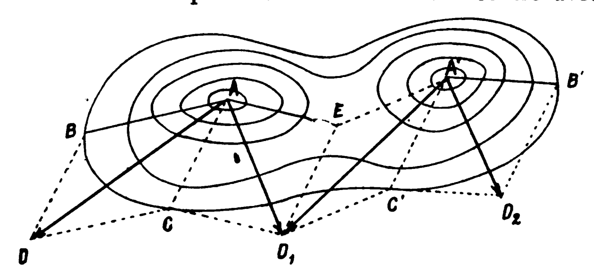


Fig. 66. — Recherche d'eau sur deux buttes de terrains perméables en petit.

une direction de la couche imperméable suivant AC, A'C'.

En opérant comme pour le cas le plus simple d'un mamelon, les zones où les eaux seront les plus abondantes seront sensiblement comprises dans les espaces DAD_1, $D_1A'D_2$.

Dans la vallée, située entre les deux mamelons, viennent s'infiltrer beaucoup d'eaux ayant ruisselé le long de leurs pentes. Les eaux souterraines y seront abondantes, principalement suivant la ligne D_1E. Si le mamelon A' a une pente plus accentuée que A, le tracé géométrique de la figure 67 montre que DE est plus rapproché de A', c'est-à-dire de la pente la plus accentuée.

Fig. 67.

Jusqu'ici nous avons considéré que le terrain imperméable sous-jacent était plat. Il arrive très souvent,

comme nous l'avons vu au chapitre II, que le terrain imperméable a été plissé et forme une série d'anticlinaux et de synclinaux. Une dépression monoclinale est celle qui existe sur le flanc d'un anticlinal. Les eaux, tombant sur ce dôme tendent à ruisseler du haut de l'anticlinal vers le bas, c'est-à-dire vers le synclinal. D'après Chalon (p. 17), une dépression anticlinale correspond au point le plus élevé du plateau, c'est-à-dire à la ligne de partage des eaux; il n'y a donc aucun intérêt à y creuser un puits. La plus grande quantité d'eau se trouve dans la vallée synclinale (fig. 19), et sur les côtés du pli on recherchera l'eau de préférence dans la vallée monoclinale car les eaux abondantes y seront peu profondes. Pour avoir le moins de frais, on se place à l'amont de la vallée monoclinale parce que l'eau est moins profonde, mais pour avoir le plus d'eau on doit se placer à l'aval.

Lorsque la couche imperméable est ondulée, comme c'est le cas du *flinz* en Bavière (fig. 68), et comme c'est

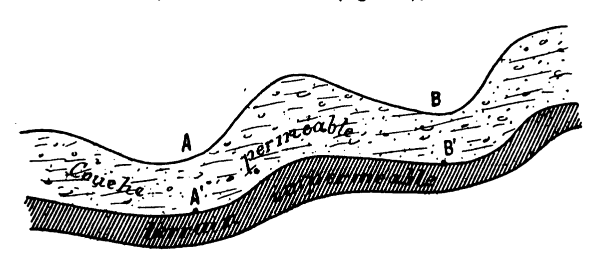


Fig. 68.

très souvent le cas sous les sables de Beauchamps, les sables de Fontainebleau, etc., les eaux souterraines s'accumulent dans les vallées du terrain imperméable. C'est donc en A', B' que se rencontreront les courants les plus importants. Or généralement ces ondulations correspondent très sensiblement à des dépressions de la surface du sol. Les endroits favorables pour creuser un puits sont donc

assez bien définis dans ces terrains. On appliquera alors, dans ce cas, les mêmes principes signalés plus haut.

Quelquefois, cependant, les ondulations de la couche imperméable ne sont pas parallèles aux sinuosités de la surface du sol.

On devra, dans ce cas, se renseigner sur toutes les exploitations de glaises ou de roches imperméables de la région et s'assurer comment varie la profondeur de ces exploitations avec la topographie. Si de telles exploitations n'existaient pas, on s'adresserait à la sonde pour être renseigné. Il est évident que le point fournissant beaucoup d'eau sera toujours celui qui est au-dessus de la déclivité de la couche imperméable.

Il arrive quelquefois qu'une dépression, un pli, recoupe le sous-sol obliquement ou perpendiculairement à la grande pente. Cette dépression joue le rôle de véritable drainage naturel et c'est suivant sa direction qu'on trouvera les eaux les plus abondantes.

Dans le cas particulier d'un terrain perméable en petit pouvant recevoir des eaux d'un terrain supérieur par infiltration à travers les éboulis, en l'absence de sources, on a des chances de trouver de l'eau dans les vallées creusées perpendiculairement aux lignes d'affleurement.

Enfin nous rappellerons que très souvent, dans les sables, certaines parties sont moins perméables que d'autres, comme nous l'avons vu dans les sables de Cuise à Irreville. Il faut alors chercher à déterminer par un moyen indiqué précédemment la zone renfermant les puits les mieux alimentés, et c'est dans cette zone qu'on aura chance d'obtenir le plus d'eau.

Deuxième cas : Terrains perméables en petit avec intercalations argileuses. — Il arrive souvent que la nappe souterraine est trop profonde. On recherche quelquefois l'emplacement possible de lentilles argileuses intercalées au milieu de la masse perméable, comme nous l'avons vu à la page 65. On n'a, pratiquement, pour

se guider, que les signes extérieurs que nous avons indiqués plus haut. De telles recherches doivent être faites de préférence dans les dépressions, car c'est là où ces nappes souterraines locales ont chance de se trouver à une moins grande profondeur.

Les nappes de cette catégorie ne peuvent fournir que des quantités d'eau relativement restreintes. Si l'une d'elles vient en affleurement, son emplacement peut toutefois être soupçonné quand on rencontre de l'eau à travers les éboulis de la vallée. On évaluera approximativement l'importance de son étendue en se basant sur les débits qu'on peut obtenir dans les puits des éboulis. Si on arrive à tirer facilement de l'ensemble des puits creusés deux litres à la seconde, on estimera très grossièrement que la lentille argileuse occupe un espace de 300 hectares (on double le coefficient de Paramelle). Si les puits sont peu nombreux on fera un forage d'essai et on pompera. En l'état actuel de la science, le hasard est le plus souvent le meilleur guide.

Troisième cas : Terrains d'alluvions et éboulis. —

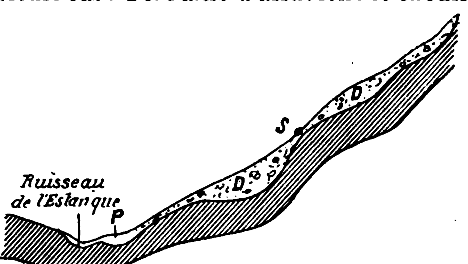


Fig. 69. — Ravin de Cazalas (Ariège), d'après P. Chalon.

Ces terrains ressemblent beaucoup aux gisements sableux mais, plus encore pour les premiers que pour ces derniers, il y a des parties très argileuses peu perméables.

Les nappes de ce genre sont très proches du sol et par

conséquent contaminées; on les estime en raison de la quantité qu'on peut en retirer. La nappe du ravin de Cazalàs dans l'Ariège est dans ce cas (fig. 69).

On trouve de l'eau surtout dans les parties en cuvette de la partie imperméable, en D par exemple si on consulte la figure.

Pour avoir beaucoup d'eau on recherche les zones où la vitesse de l'eau est maxima (1).

Dans les terrains détritiques l'hétérogénéité est la règle. Lorsque ces terrains, sur un versant, reposent directement

(1) ***Vitesse et direction de l'eau dans les alluvions.*** — Pour déterminer la vitesse et la direction de l'eau dans un terrain très meuble et perméable

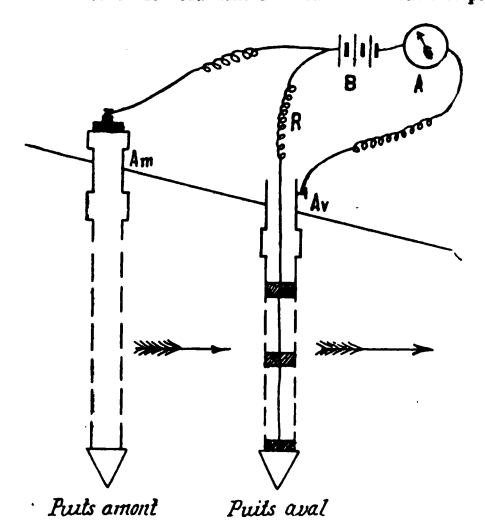


Fig. 70. — Dispositif Schlichter pour déterminer la vitesse de l'eau dans les alluvions.

comme les sables ou les alluvions, on peut employer deux méthodes, celle de Thiem et celle de Schlichter.

Thiem fore plusieurs puits, chose très facile dans ces terrains et peu coû-

sur un terrain perméable, on trouvera l'eau en abondance à l'amont des sources qu'on voit jaillir de ces terrains, dans les zones où la circulation est la plus facile.

Les nappes trouvées dans les terrains primitifs ou métamorphiques, imperméables en raison de leur compacité, ainsi que dans l'argile, n'existent que grâce à la présence d'un peu d'alluvions ou de dépôts détritiques. Comme on connaît très bien les vallées de ces terrains imperméables à forts ruissellements, c'est dans les fonds de leurs vallées qu'on trouvera le plus d'eau, quoique malgré tout elle soit peu abondante.

Enfin il est recommandé, de ne pas capter d'eau à la base de versants à trop forte pente à cause des matériaux détritiques qui l'encombrent car le captage en est difficile.

teuse, comme nous le verrons par la suite ; il jette du sel marin dans un puits amont et note le temps que met le sel à apparaître dans les puits en aval. On peut de cette façon connaître la direction du courant et la vitesse de l'eau dans la nappe. En opérant dans les sables fins de Stralsund, Thiem a trouvé que la vitesse de l'eau était de 3m,50 à 4 mètres en vingt-quatre heures pour une pente de la nappe d'environ 2 p. 100.

Il est évident qu'en faisant plusieurs expériences de ce genre, on arrive à connaître l'emplacement du point où, en creusant un puits, on peut obtenir le plus d'eau possible.

Schlichter, dans la vallée de la Western Kansas en 1901 et dans l'île de Long Island en 1903, a employé une méthode se rapprochant beaucoup de celle de Thiem, en ce sens qu'on emploie également un chlorure, mais ici le sel marin est remplacé par un chlorure d'ammonium (sel pour piles). Voici comment on opère : « Une double rangée de puits tubés de 1/4 de pouce de diamètre sont forés dans la nappe souterraine, puis on introduit dans les puits d'amont, le chlorure d'ammonium. Au lieu de s'astreindre comme Thiem, à faire, à intervalles échelonnés et fréquents, des prises d'eau dans les puits, Schlichter suit la progression de l'électrolyte dans le sol, au moyen d'un courant électrique. Au fur et à mesure que le sel avance, le courant augmente d'intensité et le galvanomètre indique un courant plus fort. Quand le chlorure d'ammonium arrive dans le puits A*v*, l'aiguille du galvanomètre fait un tour brusque. Il suffit donc de suivre la simple marche d'une aiguille pour connaître très exactement le moment où les molécules d'eau, parties du A*m*, arrivent au puits A*v*. Le meilleur dispositif à employer est celui indiqué par la figure 70.

Par ce moyen on peut, sans être astreint à des analyses, bien entendu rapides mais exigeant un certain apprentissage, à suivre la vitesse et la direction de l'eau dans les sables et les alluvions. Schlichter a trouvé, par cette méthode, que l'eau parcourait de 1 à 5 mètres par jour dans les terrains d'alluvions. Nous avons retrouvé cette même vitesse dans les mêmes terrains en employant la fluorescéine.



Quatrième cas : Terrains perméables en grand, mais homogènes. — Il y a lieu d'envisager les terrains perméables en grand, peu épais et de petite étendue. S'ils reposent sur une couche argileuse, on est toujours sûr de rencontrer à leur base de l'eau d'imprégnation. Il suffira de creuser suffisamment profond pour atteindre la couche aquifère. Le débit de l'eau trouvée par ce moyen est souvent insuffisant quand on creuse en un endroit quelconque. Or, comme nous l'avons vu dans la première partie, c'est souvent par les joints de stratification qu'on trouve le plus d'eau. M. C. T. Moulan (1) a montré que, par exemple dans le dévonien quartzo-schisteux, la circulation des eaux est continue dans le sens des bancs, c'est-à-dire dans le sens de la stratification, et discontinue à travers banc. En outre, quand une vallée est dirigée parallèlement à la ligne de pendage, les eaux collectées par elles ont toujours trouvé un écoulement facile sous la vallée même et sont arrivées à creuser des fissures suffisantes qui donnent un volume d'eau proportionné à l'étendue de l'affleurement drainé par elles.

Aussi constate-t-on, en faisant la carte des différents niveaux piézométriques d'une nappe souterraine, un abaissement très rapide suivant les petites vallées. Cet abaissement indique certainement un facile écoulement des eaux, ainsi que M. François le signale dans les calcaires de Dinant. On peut le constater encore dans la craie du bassin de Paris.

On aura donc des chances de trouver beaucoup d'eau dans les vallées. Il faut toujours se placer sur le grand versant pour avoir le plus d'eau possible. On aura également chance d'en trouver en un point quelconque d'un plateau barrant une vallée située dans la direction du pendage. Mais l'emplacement de celui-ci présente de l'aléa. Pour beaucoup d'hydrologues comme M. Gosselet,

(1) M. C.-T. Moulan, *Bulletin Société belge de géologie*, M., p. 101, 1901.

la position exacte des fissures n'obéit à aucune loi géologique. Toutefois, on sait qu'elles semblent parallèles entre elles. Quand on a trouvé un courant souterrain, une galerie normale à leur direction permet d'en trouver d'autres.

Les règles à suivre pour obtenir beaucoup d'eau sont donc approximativement les mêmes que celles indiquées dans le premier cas relatif aux terrains perméables en petit, avec cette différence toutefois que l'on doit se placer dans les vallées ou en certains points peu connus : les plateaux particuliers indiqués plus haut (1) par exemple.

Ces règles sont à peu près celles de l'abbé Paramelle, qui écrivait à ce sujet : « Les eaux d'infiltration se réunissent pour former des cours d'eau souterrains dont le volume augmente au fur et à mesure qu'ils s'éloignent de leur lieu d'origine.

« Les innombrables filets et veines d'eau, dit-il, qui se forment dans les montagnes et les collines perméables, descendent sur les couches imperméables, ne marchent pas du tout au hasard. Ils se partagent sous terre de la même façon que les eaux pluviales à la surface; en sorte que le faîte extérieur indique et suit assez exactement la ligne qui sépare les eaux souterraines : chacun des deux versants conduit tous les petits cours d'eau souterrains qui peuvent s'y former dans le vallon vers lequel il est incliné.

« Je puis avancer que, sauf quelques exceptions, dans chaque vallée, vallon, défilé, gorge et pli de terrain, il y a un cours d'eau apparent ou caché. Celui qui est apparent marche à la surface du sol parce qu'il y est soutenu par une couche imperméable; celui qui est caché marche aussi sur une couche imperméable, mais il est recouvert

(1) Pour creuser dans ces terrains un puits nécessaire à une petite exploitation, on pourra se placer en un point quelconque. Le débit qu'on recherche dans ce cas est toujours fourni par la nappe en n'importe quel endroit où on se place.



d'un terrain perméable qui ne peut le soutenir à la surface du sol. Celui qui connaît bien les lois qui président aux cours d'eau apparents peut donc suivre pas à pas un cours d'eau caché, car ils obéissent aux mêmes lois et se conduisent de la même manière. »

Mais malgré ces règles très approximatives, il ne faut pas oublier que les canaux souterrains sont très limités. En creusant un puits dans une vallée indiquée plus haut, on risque fort, 90 fois sur 100, de ne pas tomber sur les grosses fissures donnant de l'eau. Nous recommandons très instamment l'emploi de la dynamite lors de la construction de ces puits ou forages. La déflagration de cet explosif provoque des fissures latérales au puits qui vont chercher la grosse fissure donnant de l'eau. Nous nous occuperons de cette méthode de captation au chapitre spécialement rédigé sur ce sujet ; nous devons ajouter actuellement que ce procédé n'a toujours donné que de très bons résultats.

Dans les basaltes il est assez difficile d'indiquer la profondeur à laquelle on trouvera de l'eau. Mais les recherches sont généralement très satisfaisantes quand on fait des galeries.

Ce que nous venons de dire relativement aux nappes homogènes de petite étendue va nous aider à comprendre les recherches d'eau dans les mêmes nappes de grande étendue, comme par exemple la craie. Nous rappellerons qu'il y a dans ces terrains plusieurs zones émissives. L'eau peut passer souterrainement d'une zone émissive supérieure vers une zone émissive très inférieure. Les chances de trouver beaucoup d'eau sont donc d'autant plus grandes qu'on occupe la zone émissive inférieure. Sur un affleurement de très vaste étendue on n'a pas à s'occuper du débit disponible à pomper dans cette zone inférieure. L'approvisionnement est tel qu'aucune industrie ne consommera une quantité d'eau supérieure à celle donnée par la nappe souterraine. L'eau y est non seu-

lement abondante dans les vallées, mais encore très souvent sur les plateaux.

Au contraire, dans les parties supérieures d'un gisement géologique on est limité pour ce qui concerne le débit disponible. L'emplacement des puits donnant beaucoup d'eau est subordonné aux règles indiquées plus haut.

Dans ce cas encore il est utile d'employer la dynamite, car deux forages faits à 50 mètres l'un de l'autre peuvent, l'un fournir beaucoup d'eau, l'autre très peu. L'explosion de la dynamite permettra de créer un libre chemin entre ces deux zones.

Certaines études hydrologiques faites dans une région renseignent très souvent sur les particularités des terrains au point de vue de leur richesse en eau souterraine. Par exemple les études de M. Gosselet sur la craie du Nord seront très utiles à consulter. Ce savant a montré, en effet, que dans les vallées on doit creuser jusqu'à la couche de craie congloméroïde pour avoir beaucoup d'eau. De même, on sait que dans le nord de la Belgique la nappe aquifère est faible. Dans le Hainaut, au contraire, elle est abondante. Ces constatations seront des guides sérieux pour les recherches des eaux.

Pour terminer ce paragraphe nous tenons à bien rappeler que les règles à suivre, indiquées ici, sont celles qui nous paraissent être les meilleures. Nous ne nous dissimulons pas qu'elles présentent certains aléas, mais elles sont certainement des guides meilleurs que le hasard. Pour arriver à plus de certitude il est nécessaire que des études hydrologiques très sérieuses soient faites en de nombreuses régions. Les principes énumérés dans ce livre pourront servir de bases. La coordination des résultats permettra de corriger, pour les différentes régions, les règles énoncées ici qui sont loin de présenter un caractère absolu de généralité.

Peut-être arrivera-t-on par ce moyen à trouver les lois rigoureuses pour capter les eaux des fissures situées sous

les hauts plateaux, eaux qui échappent à toute règle et que, dans certaines régions, on serait très heureux de connaître. Nous ne connaissons guère que l'observation de M. d'Andrimont. Ce géologue a montré que dans le massif crayeux de la Hesbaye les fissures semblent être parallèles aux failles normales de la Campine. Il serait très utile de connaître les limites d'application de cette loi?

Cinquième cas : Terrains perméables en grand, homogènes, avec intercalations argileuses formant des nappes locales. — Il y a lieu de répéter ici ce que nous avons dit pour les terrains perméables en petit. Il faut connaître l'emplacement des intercalations argileuses; les signes extérieurs sont encore le moyen le plus pratique d'y parvenir. Toutefois, il arrive qu'on connaisse une de ces nappes locales grâce aux puits déjà existants. Ses eaux s'écoulent, en raison de la pente de la couche imperméable, vers un point dont on peut déterminer l'emplacement approximatif au moyen de l'abaissement du niveau piézométrique.

L'action dissolvante de l'eau sur le calcaire ou le gypse se fait principalement sentir là où la couche argileuse vient à disparaître. Une ou plusieurs diaclases s'agrandiront de façon à écouler le débit de la nappe locale. En creusant un puits en ce point, on aura des chances de rencontrer beaucoup d'eau. Le débit sur lequel on peut compter dépend surtout de l'étendue de la couche imperméable. Dans certains terrains, comme l'étage conchylien, on trouve une succession de couches perméables et imperméables superposées. Il est quelquefois utile de forer le puits jusqu'à la deuxième ou troisième couche imperméable pour avoir l'eau. Le débit du puits dépendra : 1° de l'étendue de l'affleurement de la partie perméable; 2° de la perméabilité relative des argiles supérieures. Rien ne permet de dire jusqu'à quelle profondeur il faudra forer, mais l'endroit où on doit se placer est celui indiqué par l'étude de la première couche argi-

leuse, celles qui lui sont inférieures étant sensiblement parallèles à elle.

Sixième cas : Terrains perméables en grand, très hétérogènes avec nappes localisées, courants souterrains, etc. — On admet que dans ces terrains il y a deux circulations superposées : une à la base de l'affleurement, sur la couche argileuse déjà envisagée dans le quatrième cas, l'autre sous forme de courants souterrains provenant soit d'infiltrations de rivières superficielles, soit du drainage des eaux de pluies, infiltrées après avoir ruisselé souterrainement sur une couche imperméable formée soit d'argiles, de marnes ou de la roche même très peu fissurée. Nous avons déjà eu l'occasion d'en parler en traitant l'hydrologie générale.

Le plus souvent la nappe, à la base de l'affleurement, est bien trop profonde pour être atteinte par les puits ou forages. On a tout intérêt à connaître un moyen de rencontrer les courants souterrains plus superficiels.

Dans beaucoup de cas on doit avouer que cette recherche est assez délicate. Très souvent on peut se tromper dans ses conclusions. MM. Gosselet, Rutot, Van den Brœck, etc. prétendent même qu'on doit avouer son ignorance.

Cette opinion, très vraie quand il manque à la surface des signes particuliers pouvant faire soupçonner un courant souterrain, semble exagérée dans le cas contraire.

Ainsi, un des premiers signes est la ligne des effondrements dus à l'écroulement des voûtes de ces courants souterrains. Bien entendu, ces effondrements n'indiquent pas toujours un courant souterrain. Ce procédé a réussi dans l'Eure, échoué dans la Charente sans qu'on puisse en être averti.

Le courant a pu abandonner son ancienne diaclase et trouver un autre chemin plus ou moins éloigné du premier. Malgré cette circonstance, on doit choisir ces points d'effondrement pour y creuser un puits ou un forage. Si

on construit un puits il est utile, au fur et à mesure qu'on le descend, de suivre avec un stéthoscope l'importance des bruits perçus. Ces bruits souterrains peuvent, comme nous l'avons vu, être dus à un courant d'air qui souffle dans une fissure, mais le plus souvent ils proviennent d'un courant souterrain. Il faut s'arrêter alors à l'étage où ce bruit semble être le mieux perçu et employer la dynamite.

Ces bruits souterrains sont quelquefois entendus à la surface du sol. Le puits ou le forage doivent être creusés là où ce son est le plus intense.

L'étude, assez exacte, du périmètre d'alimentation permet de connaître la direction à vol d'oiseau des grands courants souterrains. Par exemple, dans la vallée de la Vanne, si on voulait avoir de l'eau en amont de Bérulles, les études du périmètre d'alimentation de cette source et de celle d'Armentières montrent la présence d'un courant souterrain venant de la Guinand vers Bérulles, c'est-à-dire très approximativement dans la vallée qui passe par Berluviers. Tout ce que nous avons dit dans le quatrième cas sera utile ici pour la recherche des courants souterrains avec en plus l'emploi fréquent du stéthoscope.

Les expériences à la fluorescéine ou par tout autre procédé permettent de suivre la direction d'écoulement des eaux d'une rivière engouffrée dans le sol jusqu'à une source. Elles peuvent aider à trouver sous un plateau donné la zone approximative où on a chance de rencontrer l'eau. Les canaux souterrains sont aussi sinueux que les rivières superficielles ; mais, de chaque côté de la ligne droite, partant de la pente de la rivière et aboutissant à la source atteinte par la fluorescéine, ces sinuosités occupent très souvent une zone d'un demi-kilomètre de largeur.

L'eau se trouvera alors à peu de frais dans une vallée qui coupe cette bande assez large ; la profondeur approximative à laquelle on trouvera l'eau est basée sur l'hypothèse très vague d'une pente uniforme partant

de la perte de la rivière et aboutissant à la résurgence.

On commence par faire un premier puits ou forage dans cette vallée au centre de cette zone en utilisant la dynamite. Si on ne trouve pas suffisamment d'eau après être descendu au-dessous de la profondeur déterminée approximativement par la règle que nous venons d'indiquer (si h est la profondeur ainsi calculée, $h \times \frac{3}{2}$ représente la profondeur qu'on devra atteindre) on en fera un autre à droite ou à gauche à 100 mètres de distance en employant ici encore, s'il le faut, la dynamite.

Nous avons vu que les anticlinaux sont réputés comme très riches en diaclases (1). Lorsque la zone ainsi définie et de un kilomètre de largeur, déterminée par les expériences à la fluorescéine, rencontrera un anticlinal, on a le plus de chance de trouver l'eau à leur point de rencontre.

Ainsi sur le plateau de Saint-André, entre Évreux et Cailly, si on voulait creuser un puits donnant beaucoup d'eau, nous le placerions dans l'endroit où l'anticlinal de Saint-André recoupe la ligne partant d'Évreux à Cailly, une expérience à la fluorescéine ayant montré qu'Évreux communique avec la source de Cailly (2).

Lorsque la source située à la base de la vallée où se trouve la rivière se perdant, le courant souterrain est en partie dans la vallée même. On peut encore se servir comme guide des règles de l'abbé Paramelle indiquées dans le quatrième cas.

Dans les terrains granitiques ou métamorphiques on trouve quelques grosses fissures qui drainent une cer-

(1) Les failles sont aussi des lignes suivant lesquelles on rencontre beaucoup d'eau. Comme très souvent la direction des diaclases est parallèle à celle des failles, les puits à grand débit devront être creusés dans les vallées parallèles aux failles. On aura beaucoup de chance d'y rencontrer des terrains souterrains.

(2) Voir carte géologique, feuille d'Évreux.

taine quantité de ces petites nappes locales et qui peuvent donner naissance à des sources assez volumineuses, comme celles de Châteauneuf ou de Giat (arrondissement de Riom).

Pour ces terrains, l''emploi des puits avec la dynamite a donné de très bons résultats dans le Morbihan, par exemple à Cornac.

Toutes ces méthodes ne sont qu'approximatives, elles sont surtout basées sur les résultats des études hydrologiques et sur les idées que nous nous faisons de la circulation souterraine. Elles sont plus scientifiques et plus rationnelles que les belles promesses de certains empiriques qui promettent beaucoup d'eau, se font payer très cher et disparaissent avant que leurs dupes se soient aperçues de l'abus de confiance dont elles venaient d'être la victime. Quand un de ces prétendus hydrologues vient affirmer qu'en un point déterminé et très restreint on trouvera un courant souterrain, on peut être certain qu'il avance des conclusions incertaines. Nous avons eu l'occasion de constater les effets de telles consultations ; il est bon de mettre en garde les agriculteurs contre de tels fléaux.

Comme c'est l'étude rationnelle la plus complète possible du périmètre d'alimentation qui permet le mieux de se rendre compte de la circulation souterraine, de son allure et de ses défauts, il est évident que les indications données ici devront être modifiées quand on aura constaté le sens approximatif de l'écoulement souterrain. Il serait très utile que l'État ou les départements fassent faire une étude très détaillée par des spécialistes de ces nappes multiples à rivières souterraines. Des résultats obtenus l'agriculteur trouverait d'utiles renseignements pour l'emplacement rationnel des puits.

A défaut de puits particuliers, une commune ou plusieurs pourraient se syndiquer de façon à faire une captation unique en un point convenable où on a chance de rencontrer beaucoup d'eau.

Septième cas : Terrains perméables en grand fortement inclinés, plissés et faillés. — Nous avons vu précédemment, dans le cas des eaux souterraines voisines de Lille, qu'il pouvait y avoir alternance de couches fortement plissées, les unes imperméables, les autres perméables. Deux puits creusés à 500 mètres de distance peuvent donner des résultats différents. Le seul procédé scientifique qui permette de connaître l'endroit où on peut faire un puits consiste à relever les différents affleurements et au moyen de sondages d'évaluer l'inclinaison approximative des couches.

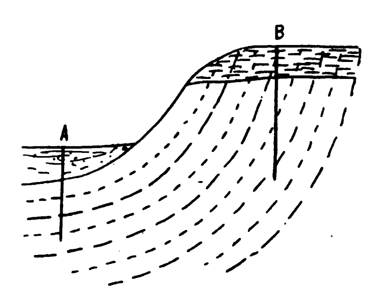


Fig. 71. — Recherche d'eau dans un terrain fortement redressé.

La forte inclinaison des strates est souvent une difficulé pour avoir de l'eau (fig. 71). Les eaux sont facilement absorbées par le sol et viennent se rencontrer à la base de ces terrains. Un puits creusé en B est souvent improductif; au contraire, un puits creusé en A donnera certainement de l'eau.

Toutefois un terrain fortement incliné est très aquifère quand ses eaux peuvent être arrêtées dans le sol par une partie imperméable, parce que (fig. 72) les joints de stratification facilitent l'engouffrement des eaux superficielles. Quand la couche imperméable est peu profonde, tous les puits sont productifs.

Les terrains fortement plissés sont très mauvais pour une étude hydrologique simple. On y trouve des successions de couches n'ayant pas la place que leur assigne l'époque de leurs dépôts. L'endroit où on rencontrera de l'eau est

assez difficile à trouver, surtout lorsque des intrusions de terrains éruptifs viennent compliquer la perméabilité des couches souterraines et créer des nappes très localisées.

On s'aide souvent dans ce cas de la présence des failles, très répandues dans ces terrains fortement plissés. La faille draine toutes les diaclases qu'elle recoupe et c'est sur toute sa longueur qu'on a chance de trouver de l'eau. Malheureusement, très souvent un grand nombre de ces failles facilitent l'arrivée au jour d'eaux minérales chaudes

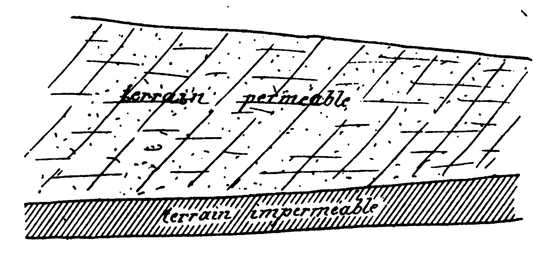


Fig. 72. — Terrain perméable schématique à joints de stratification très redressés.

qui ne permettent pas leur emploi au point de vue agricole. L'étude attentive du périmètre, la mesure de leur température, de leur degré de minéralisation, etc., permet de se rendre compte des eaux qui sortent de ces terrains faillés ou plissés. Si, en dehors des sources des terrains détritiques, fréquents dans ces formations, il en existe d'autres dont la température se rapproche de celle du lieu, on peut espérer rencontrer dans les failles de ces terrains des eaux utilisables aux besoins agricoles.

Dans le Puy-de-Dôme on rencontre une grande quantité de ces eaux très pures et de température voisine de 5 à 6°. M. Schardt a montré, sous le Simplon, des failles dans lesquelles les eaux chaudes cotoyaient les eaux froides. Il lui a été possible, par captage, de séparer

ces deux eaux. Au moyen de doubles puits on arrive à cette séparation (1).

Septième cas : Recherches des nappes artésiennes. — L'industriel ou le cultivateur demande très souvent non seulement des eaux abondantes, mais encore des eaux qu'il lui sera commode d'utiliser sans être obligé de dépenser un travail pour les amener à la surface du sol. En creusant un puits chacun a le secret espoir de rencontrer une nappe artésienne.

Voici, d'après M. T. C. Chamberlin, les conditions requises pour avoir un puits artésien débordant :

1) Une couche perméable permettant l'entrée et le passage de l'eau ;

2) Une couche étanche par-dessous pour empêcher l'eau de descendre plus bas ;

3) Une couche imperméable par-dessus afin que l'eau conserve la pression qu'elle doit aux affleurements originaires (*fountain head*) ;

4) Une inclinaison de ces couches, telle que le lieu de pénétration de l'eau soit plus élevé que la surface du puits ;

5) Des conditions climatériques et une exposition convenable pour que les affleurements de la couche perméable puissent recevoir une quantité de pluie suffisante ;

6) L'impossibilité pour l'eau de trouver un moyen de s'échapper à un niveau plus bas que l'orifice du puits.

L'étude géologique de la région, la superposition des diverses couches, l'examen de leurs affleurements faisant prévoir la forme en cuvette des couches permet de soupçonner l'endroit où on trouvera des eaux artésiennes.

Dans un terrain donné on peut trouver des eaux jaillis-

(1) De Launay, *Comptes rendus*, 1906.

(1) *Requisite and qualifying Conditions of artesian Wells* (Report du geological Survey).



santes si un canal souterrain est suffisamment imperméable pour laisser les eaux s'écouler en charge sous une dépression des terrains. Ainsi par exemple à Noë, dans la vallée de la Vanne, on peut espérer trouver des eaux jaillissantes en crevant la conduite qui fait communiquer les eaux de Villiers-Louis avec la source de Noë (Voy. fig. 37.)

Mais le plus souvent, dans ces terrains perméables, on ne peut espérer qu'obtenir des eaux dites captives quand on tombe sur une diaclase importante. Pour obtenir des eaux jaillissantes il faudrait augmenter les précipitations atmosphériques dans la région qui absorbe la plus grande partie des eaux drainées par la diaclase en question.

Il convient de signaler un autre genre de nappes artésiennes dont M. Gosselet a donné la théorie.

Dans le nord de la France, dans la craie congloméroïde, on trouve des nappes artésiennes qui ne semblent pas exister grâce à l'intercalation d'une couche perméable entre deux couches imperméables.

D'après M. Gosselet, cette eau arriverait en certains points du gisement géologique avec une telle vitesse qu'elle serait animée d'une certaine force vive lui permettant d'être jaillissante. C'est ainsi qu'on voudrait expliquer la présence remarquable d'eaux artésiennes à la base des sables de Long Island et dans le drift de l'État de Michigan.

Il est bon de faire remarquer que, d'après ce que nous avons vu sur la circulation de l'eau dans les sables, l'homogénéité n'est que l'exception. On pourrait admettre qu'il existe dans le Long Island une couche de sable très facilement perméable comprise entre deux couches sableuses peu perméables, sans être obligé, pour expliquer la présence des eaux artésiennes, de faire intervenir la force vive du travail de descente.

VIII

MOYENS D'AUGMENTER LA QUANTITÉ D'EAU ABSORBÉE PAR LE SOL.

Nous n'avons pas l'intention de présenter une solution certaine de ce problème, mais seulement de montrer ce qui a été fait jusqu'ici et ce qu'il reste encore à faire.

Quand l'affleurement est insuffisant pour donner la quantité d'eau nécessaire, si on cherche à augmenter la quantité d'eau absorbée par le sol, plusieurs solutions se présentent :

1° Augmenter l'intensité des précipitations atmosphériques ;

2° Diminuer l'évaporation et le ruissellement en favorisant l'absorption des eaux pluviales;

3° Faire absorber des eaux de ruissellement venant d'un autre périmètre.

Augmentation de l'intensité des précipitations atmosphériques. — La pluie est, comme nous l'avons vu, le résultat de la condensation de la vapeur d'eau. Pour qu'elle se manifeste il faut de la vapeur d'eau dans l'air et en quantité suffisante pour qu'il y ait saturation de l'air à la température des régions où ce phénomène se produit.

Augmenter la quantité d'eau dans l'atmosphère est une opération impossible dans le cas qui nous occupe.

Il nous faut prendre l'air tel qu'il est et arriver à abaisser sa température par un moyen quelconque pour favoriser la formation de la pluie. Tout moyen permettant le refroidissement artificiel de l'air serait pratique si continuellement ou par un moyen artificiel quelconque on pouvait arriver à favoriser l'arrivée des vents humides, principalement pendant la période où les eaux

de pluie profitent à la nappe souterraine, c'est-à-dire en hiver.

On n'est malheureusement pas maître de la direction des vents. Pour amener une augmentation dans la précipitation atmosphérique du Sahara on prétend qu'il faudrait y créer un immense lac pour saturer l'air d'humidité, mais ce moyen ne ferait pas varier le sens de la circulation aérienne.

On a essayé les fusées ou autres explosifs de cette sorte pour produire des pluies artificielles, en se basant sur ce fait qu'après les batailles il y avait toujours une précipitation atmosphérique. Les expériences poursuivies en 1893 ont donné des résultats tellement incertains qu'il serait nécessaire de les recommencer. Le bureau météorologique des États-Unis leur dénie même toute valeur scientifique.

Peut-être arriverait-on à produire de la pluie au moyen de fusées lancées a une grande hauteur dans l'atmosphère. Ces fusées en éclatant fournissent des poussières. Chacun sait que l'air non chargé de poussières peut rester sursaturé d'humidité. C'est ce qu'on constate dans les grandes altitudes (1). Les poussières provenant de l'explosion des fusées détruiraient la sursaturation des couches élevées de l'air et il se formerait de la pluie.

La quantité d'eau obtenue par ce procédé ne serait peut-être pas très grande, mais il est assez difficile de l'évaluer *a priori* sans expériences rigoureuses.

On connaît des exemples, en Amérique, de pluies formées après l'incendie d'une forêt ou d'une prairie. On peut en attribuer la cause non seulement aux fumées ascendantes chargées de poussières, mais encore à une circulation d'air permettant aux courants d'air chauds et humides de gagner les couches supérieures mais froides de l'atmosphère. Ce moyen semble bien peu pratique pour l'agriculture de nos pays.

(1) Angot, *Traité élémentaire de météorologie*, p. 191.

Le seul moyen pratique et actuellement connu de refroidir une masse d'air est de créer une forêt. Son action est très complète, c'est pourquoi nous l'examinerons dans un paragraphe spécial. Mais que faire si on ne dispose pas d'air humide?

En résumé, l'action de l'homme sur l'atmosphère ne semble pas très grande. Si, à la rigueur, elle peut s'exercer, les méthodes à employer sont loin d'être jusqu'ici pratiques. Tout est, dans une certaine mesure, à faire dans cette voie; c'est malheureusement une question peu creusée par les météorologistes.

Diminution de l'évaporation et du ruissellement des eaux. — L'évaporation par le sol et les plantes représente 75 p. 100 des pluies tombées, le reste est acquis à la nappe et au ruissellement, un gain de 10 à 20 p. 100 sur cette évaporation augmenterait, dans une très grande proportion, le profit des nappes souterraines.

Pour diminuer cette évaporation on peut : ou bien diminuer l'action du soleil, ce qu'on obtient au moyen d'un couvert feuillu abondant, ou bien ralentir l'action des vents qui favorisent cette évaporation. On y arrive en localisant l'effort, c'est-à-dire en sacrifiant une partie du périmètre au profit de l'autre partie, comme autrefois on mettait une partie de la propriété en jachère pour consacrer la fumure à l'autre partie. Au point de vue pratique, pour répondre à ces *desiderata* on doit créer une forêt formée d'essences très feuillues, évaporant le moins d'eau possible, parce qu'il ne faudrait pas, en diminuant l'évaporation du sol, perdre ce gain au moyen de l'évaporation végétale.

Nous retrouverons cette question traitée au paragraphe de l'action des forêts sur les nappes souterraines.

Il est également facile de diminuer le ruissellement en créant de nombreux obstacles à l'écoulement des eaux sur le sol. Les forêts remplissent ce but.

En creusant, de part et d'autre, le long des thalwegs,

des puits d'absorption, on écoule également dans la nappe les eaux de ruissellement.

M. Rutot est d'avis que, la nappe de la Hesbaye étant de faible importance à cause d'un épais manteau argileux imperméable qui la recouvre, il serait nécessaire de la renforcer artificiellement en creusant dans les dépressions de vastes entonnoirs remplis de sables, destinés à recevoir les eaux de ruissellement. On arriverait à empêcher l'épuisement rapide de cette nappe par toutes les sucreries qui s'y alimentent.

La forêt semble répondre dès maintenant aux *desiderata* de ceux qui veulent augmenter leur alimentation en eau.

Influence des forêts sur les nappes souterraines. — L'influence des forêts sur les nappes souterraines ayant une très grande importance sur l'hydrologie, il nous a semblé utile d'en faire un paragraphe spécial.

Dans la forêt nous distinguons deux parties, l'une superficielle constituée par les arbres et leur couvert, et de la couverture du sol ; l'autre formée du sol lui-même. Cette couverture est constituée par les débris de feuilles et de branches provenant des arbres et de la végétation très variée qui existe dans toute forêt. Ces débris de feuilles et de branches sont soumis à une décomposition très active qui les transforme en substances spongieuses, formant l'humus.

Nous aurons donc à examiner successivement l'influence des deux parties du couvert d'un sol forestier sur l'augmentation de la quantité de pluie, sur la pluie qui tombe et sur les eaux infiltrées dans le sol. Le profit que la nappe retirera de ces pluies dépendra à chaque instant de ces diverses influences.

Augmentation de la quantité de pluie. — Depuis longtemps on a reconnu que la forêt avait la propriété d'augmenter la quantité d'eau de pluie. Cette influence est due aux arbres et à leur couvert. Les arbres forment un obstacle au vent et forcent ceux-ci à remonter

dans les parties plus supérieures et froides de l'atmosphère où a lieu la condensation de la vapeur d'eau. D'autre part, l'évaporation d'une forêt est si active que la température de l'air au-dessus d'elle est plus basse qu'en plaine. Ces deux facteurs contribuent donc à l'augmentation de la quantité d'eau de pluie tombant sur une forêt. M. Mathieu a montré aux environs de Nancy qu'il en était bien ainsi. La pluie est toujours de 20 à 25 p. 100 plus abondante sous bois que hors bois.

En outre, les arbres possèdent la propriété d'être en toute saison et à chaque instant plus froids que l'air qui les entoure. La différence de température est plus grande en été que l'hiver, le jour que la nuit, elle est aussi plus grande dans le bas du fût que dans les branches (résultats obtenus par les stations bavaroises). Hüffel cite à ce sujet la formation considérable du givre sur les branches. Il en résulte une condensation de vapeur d'eau le long des arbres. La pluviosité et la condensation de l'eau augmentent donc grâce à la présence des feuilles et des arbres.

La couverture du sol a également une influence sur cette condensation. Nous avons vu que l'humus est très hygroscopique. Il retient un poids d'eau supérieur au sien et condense les eaux de l'atmosphère. En résumé. toutes les parties d'une forêt concourent à l'augmentation de la chute des eaux de l'atmosphère au profit du sol.

Influence sur la pluie qui tombe. — Ces eaux, prises à l'atmosphère, rencontreront des obstacles à leur acheminement souterrain, tant il est vrai que dans la nature on trouve toujours une perte à côté d'un profit. Les feuilles et les branches forment un couvert qui est comme un rempart aux eaux qui tombent. M. Ney trouve que :

			Eau tombée en hiver.
Les cimes	des hêtres	retiennent..........	7 p. 100
—	des pins	—	15 —
—	d'épicéas	—	20 —

Soit en général moins que l'augmentation de la pluviosité.

Mais les eaux tombées sous le couvert d'arbres s'évaporent moins vite qu'en plaine. M. Mathieu a montré que l'évaporation d'une couche d'eau était en effet de 10 p. 100 moindre qu'en plaine. Elle doit encore être moindre là où l'eau est retenue énergiquement par la couverture d'humus.

Le couvert du sol oppose de nombreux obstacles à l'écoulement des cours et par conséquent diminue beaucoup le ruissellement. Dans les terrains très en pente, là où le ruissellement est abondant, la forêt empêche la création des torrents. Aussi, dans les Alpes ou les Pyrénées, les habitants ayant fortement déboisé, il s'est formé de nombreux torrents, qui sont pour le pays un véritable fléau. La température moyenne de l'air est toujours plus élevée en hiver sous bois que hors bois. Le sol ne gèle jamais dans la forêt, quoique la fonte des neiges y soit beaucoup plus lente à cause de la non influence du soleil pendant le jour. Or, le non durcissement du sol par la gelée favorise l'infiltration des eaux en hiver et diminue encore le ruissellement. En résumé, la forêt tend encore à augmenter le bénéfice des eaux de pluies au profit du sol : 1° Par suite de la diminution de l'évaporation sous bois;

2° Par suite de l'hygroscopicité de l'humus ;

3° Par suite de l'absence de gel du sol.

Influence sur les eaux infiltrées. — Le profit que le sol retire de la présence de la forêt n'est pas entièrement acquis par la nappe souterraine. Les racines des arbres de la forêt pompent, en été surtout, l'eau du sol. Celle-ci sert à porter la nourriture aux tissus de l'arbre, à assurer sa croissance et est ensuite évaporée par les feuilles. Ici nous devons distinguer deux périodes, l'été et l'hiver.

Comme nous l'avons déjà dit, en été, l'évaporation est

très active, mais les pluies ne profitent pas aux nappes souterraines (1).

Au contraire, à cette époque, la condensation des vapeurs atmosphériques est plus intense, et pour ce motif, Tassy admettait que la quantité d'eau évaporée en été par une forêt provenait surtout de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique.

Un arbre évaporera d'autant plus d'eau qu'on lui en fournira davantage. C'est ce qui arrive quand la nappe souterraine n'est qu'à 4 ou 5 mètres du sol. Certains auteurs comme Henry, Ototzky Tolsky, ont trouvé que la nappe souterraine était plus basse sous bois que hors bois. Ils s'étaient placés dans des régions où la nappe souterraine était peu profonde. Mais jusqu'ici aucune expérience n'a été faite dans les forêts où la nappe était à 15 ou 20 mètres de profondeur.

Donc, jusqu'à présent, rien ne prouve que la forêt ait une influence défavorable sur les eaux souterraines, car les résultats de ces auteurs sont loin d'être convaincants, et M. Hartmann, en Bavière, est même arrivé à des résultats différents.

Pour savoir si une forêt est défavorable à la nappe souterraine, voici le principe suivant lequel il faudrait opérer. Prendre un vaste terrain plat et étudier pendant quelques années la pluviosité et la circulation souterraine de ces eaux d'après les méthodes indiquées plus haut.

Au bout de ces quelques années, diviser ce terrain en deux parties égales, planter l'une en bois et cultiver l'autre. Au bout de plusieurs années, par une étude suivie de la pluviosité et de la circulation souterraine dans ces deux parties, on arrivera à connaître l'influence des forêts. Celle-ci doit être plus grande au centre de la forêt que sur les bords. C'est une étude de longue haleine

(1) Dausse. De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau. (*Ann. des Ponts et Chaussées,* 2e série, 1er semestre 1842, p. 184).

qu'on pourrait peut-être remplacer par la méthode suivante, qui donnerait des résultats plus rapides.

On choisit un gisement géologique uniforme peu incliné et dont les eaux souterraines reposent sur une couche argileuse imperméable. A la base de ce gisement devront se trouver plusieurs sources dont on étudiera le périmètre d'alimentation d'après les principes passés en revue précédemment. On notera également sur chaque partie du périmètre boisée et non boisée la pluviosité, l'évaporation, le ruissellement, etc. Si les sources du périmètre boisé ont un débit moindre que celles alimentées par le périmètre non boisé, on pourra en conclure au bout de quelques années que la forêt a une influence nuisible sur les nappes souterraines.

Pour éviter d'être trop long, nous ne faisons ici que de donner le principe de la méthode ; nous n'ignorons pas qu'il y a des difficultés de détails à lever, mais cette étude est possible en plusieurs parties de France et surtout en Russie.

En Suisse, dans l'Emmenthal, M. Bourgeois a adopté un autre dispositif. Il a choisi les bassins d'alimentation du Rappengräbli et du Sperbelgraten, affluents secondaire de l'Emme.

Ces périmètres ont de 80 à 100 hectares, orientés tous deux au sud-ouest, constitués par la même nature du sol et dont l'altitude varie de 980 à 1230 mètres pour le Rappengräbli, 900 à 1200 mètres pour le Sperbelgraben. Le premier ne porte que 18 p. 100 de forêts, le second 91 p. 100 (futaies irrégulières de sapins). Il a installé des appareils automatiques pour le jaugeage des ruisseaux, la détermination de la pluie.

Depuis la mort du professeur Bourgeois, M. Engles poursuit ces études.

Mais jusqu'ici nous n'avons traité que les pluies d'été. En hiver, dans les forêts d'arbres à feuilles caduques, l'évaporation est nulle et les pluies profitent aux nappes.

D'après ce que nous avons dit au sujet de l'influence des forêts sur les pluies, l'évaporation par les feuilles, qui est l'obstacle principal, n'existe plus, et tout porte à croire que la forêt a une influence favorable sur les eaux souterraines. Or c'est ce qu'on constate. Les sources les plus abondantes se rencontrent au pied des montagnes les plus boisées. Le département de la Côte-d'Or, dans le Chatillonnais, toute la partie boisée du plateau de Langres sont très riches en sources abondantes. Dans la région de la Vanne ce sont les sources de la forêt d'Othe qui ont les plus forts débits.

Dans ces régions on distingue généralement deux parties dans le périmètre, une partie boisée sise à l'amont, et une partie cultivée à l'aval.

Or en hiver la forêt augmente la quantité d'eau à l'amont, puis ces eaux souterraines circulent et viennent s'emmagasiner à l'aval, sous la partie cultivée. Cette dernière profite donc de l'influence de la forêt. En été, si véritablement la forêt a une influence funeste sur les eaux souterraines, cette partie, emmagasinée sous la région cultivée, échappera à l'action évaporante des arbres. C'est ce qui se passe dans la région de la Vanne.

On a donc intérêt à boiser les parties amont des périmètres, qui le plus généralement sont moins faciles à cultiver que les parties aval. Ce résultat ne peut être obtenu que par l'association des propriétaires. Il résulte, en outre, des faits envisagés dans ce paragraphe que l'étude de l'influence des forêts sur les eaux souterraines est très importante au point de vue pratique. Il serait nécessaire de la continuer dans plusieurs régions de la France, là où la nappe souterraine est peu profonde.

Les conclusions des expériences faites jusqu'ici dans ces endroits sont encore incertaines. On n'est certain de l'influence favorable des forêts que là où les eaux souterraines sont profondes (15 à 20 mètres).

Épandage des eaux superficielles. — Au lieu de

s'adresser directement aux eaux de pluies, on peut, pour augmenter le débit de la nappe souterraine, prendre les eaux qui ont ruisselé dans des régions supérieures, ou qui sont sorties des sources issues à l'amont. Ces eaux, qui se dirigent vers la mer, ne pourront revenir au sol que par les pluies. L'évaporation et la condensation, qui est nécessaire ici, demandera un temps plus ou moins long. Au contraire, si on vient à les étaler en nappe mince à la surface du sol, elles seront en un court instant absorbées et profiteront bientôt à la nappe. Toutefois il faut se souvenir que les eaux superficielles qu'on prend dans les rivières sont soumises à des contaminations tout le long de leur parcours, sans compter d'autres causes de pollutions à la surface du sol où se fait l'épandage. Puisque ces eaux peuvent être dangereuses à boire à l'état naturel, le sol, par lui-même, devra être filtrant, comme nous aurons l'occasion de le voir par la suite, c'est-à-dire que tous les germes passent assez près de la surface des particules du sol pour y être retenus. Il n'y a guère que le sable qui puisse être employé pour le renforcement des nappes, car c'est de tous les terrains le seul qui permette une filtration suffisante dans des conditions bien déterminées. Les alluvions de certaines vallées peuvent également servir.

IX

DIMINUTION DU DÉBIT DES SOURCES

A cette question de l'augmentation du débit des sources se rattache le problème inverse relatif à l'abaissement progressif du niveau des nappes souterraines. Dans la campagne, on entend partout les habitants se plaindre que leurs puits tarissent et qu'ils so n dans la nécessité de les faire recreuser. Souvent ils ne

s'embarrassent pas pour trouver une cause indubitable à leurs yeux et, dans toutes les régions où une ville importante est venue capter les sources, c'est au captage de celles-ci qu'on attribue la baisse du niveau des puits.

Il est malheureusement impossible d'admettre cette explication aussi simpliste. Je dis *malheureusement* parce qu'en effet la question devient très importante et très inquiétante quand on s'aperçoit de sa généralité.

L'appauvrissement des nappes est attribué à beaucoup de causes : certains auteurs admettent que la première et principale influence est due à l'enfouissement progressif des cours d'eau souterrains. D'après ce que nous avons vu, il est évident qu'au fur et à mesure que le calcaire se dissout, les courants souterrains tendent à s'enfouir de plus en plus jusqu'au moment où ils atteindront la partie imperméable, sur laquelle ils reposent. M. Martel a montré par un certain nombre d'exemples, l'influence de cet enfouissement progressif.

Ainsi, la Hermann's Höhle à Rübeland (Harz) possède plusieurs étages de lits desséchés qui confirment l'enfouissement progressif des eaux souterraines.

De même dans l'île de Pérégil, la fameuse grotte de Calypso, très probablement décrite par Homère, ne possède plus les quatre sources indiquées dans son Odyssée.

Cette hypothèse ne peut à elle seule arriver à expliquer pourquoi certaines sources tarissent. En 1905-1906, il est tombé beaucoup d'eau dans le bassin parisien. Un certain nombre de sources qui, depuis vingt ans environ, étaient taries, se sont remises à couler dans la vallée de l'Avre, par exemple. Une année très humide a donc suffi pour réparer en partie l'influence néfaste d'une série d'années sèches. Depuis plus d'un siècle on constate que les pluies et surtout les neiges deviennent moins abondantes dans nos climats. M. Houllier nie cette influence parce que

dans le cours du XIXe siècle il y a eu des périodes très sèches sans qu'on puisse trouver des tarissements aussi importants qu'actuellement. Il ne faudrait cependant pas oublier qu'une série successive d'années sèches arrive forcément à avoir une importance très grande sur le débit des sources. Une série d'années humides serait nécessaire aux nappes pour redonner l'importance qu'elles avaient au début du XIXe siècle. Jusqu'ici ce sont les années sèches qui sont les plus nombreuses, M. Houllier a donc tort de nier cette cause. Il élimine l'influence des forêts et accorde une part prépondérante à la culture intensive actuelle. Autrefois, on faisait de la jachère, actuellement on n'en fait plus, d'où un appauvrissement successif des nappes souterraines.

MM. Gosselet et Grossouvre prétendent à leur tour que la cause première de ce phénomène est la mauvaise répartition des pluies. Il pleut moins en hiver, d'où un profit moindre pour les nappes souterraines. Ceci est très juste. D'autre part, pour M. Grossouvre, nous faisons tout pour perdre notre eau.

Le drainage, le curage, le faucardement favorisent l'écoulement des eaux vers les rivières et augmentent le ruissellement.

Il propose comme remède de rétablir les étangs qui permettraient d'emmagasiner l'eau de ruissellement de façon à en faire des rivières l'été.

Les deux problèmes de l'appauvrissement des nappes souterraines et de l'augmentation des eaux souterraines sont donc liés entre eux très étroitement. Les causes indiquées par MM. Houllier, Gosselet, Grossouvre, Martel, et résumées ici, ont une influence certaine.

Il est malheureusement encore impossible d'y apporter un remède scientifique absolument inattaquable. Le reboisement semble cependant actuellement la solution la plus pratique.

TROISIÈME PARTIE

QUALITÉ DES EAUX

I

DE LA QUALITÉ DES EAUX CAPTÉES EN GÉNÉRAL

Le problème qui consiste à trouver le moyen d'obtenir le plus d'eau possible est assurément un des plus importants, mais la quantité ne suffit pas, il faut encore que la qualité des eaux obtenues réponde aux besoins de l'exploitation.

Nous avons déjà vu, au commencement de ce livre, qu'une eau ne doit généralement pas être trop chargée en sels. Pour la brasserie, par exemple, l'eau doit renfermer le moins possible de sulfate et de magnésie et être de composition très constante. Pour la laiterie et les eaux servant à l'alimentation, il est nécessaire qu'elles soient claires, fraîches. Il faut éviter que les eaux soient souillées par des infiltrations suspectes de fosses d'aisances ou de purin. Pour la tannerie, il faut des eaux aussi peu minéralisées que possible.

Enfin, pour les eaux servant à l'alimentation des machines à vapeur les sulfates, la trop grande quantité de carbonate et la magnésie sont nuisibles et exigent certaines opérations de détartrage qui sont d'une part coûteuses et d'autre part usent les chaudières.

L'eau qu'on désire capter doit donc avoir une compo-

sition répondant le mieux possible aux *desiderata* de l'industrie ou de l'exploitation agricole envisagée.

Contrairement à la façon dont la plupart des auteurs ont traité la question, la solution pratique du problème n'est pas seulement de connaître la nature de l'eau une fois le puits creusé. On aurait souvent fait certaines dépenses en pure perte si, à l'analyse, on s'apercevait par la suite que la qualité de l'eau est mauvaise. Il faut pouvoir avant tout forage de puits se faire une idée de la nature approximative des eaux que l'on va rencontrer.

II

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES D'UNE EAU

Avant d'aborder ce problème il est utile d'indiquer les propriétés physiques d'une eau et les moyens de l'apprécier.

Couleur des eaux. — En règle générale, une eau doit être incolore. Vue sous une certaine épaisseur, les eaux sont diversement colorées selon les terrains traversés et les substances qu'elles dissolvent.

L'eau du lac Léman est bleue, tandis que celle du lac de Constance est verte et celle de Nantua jaune.

La coloration verte de l'eau a fait l'objet d'un travail très détaillé de Spring qui l'attribue à des particules en suspension.

Quelle qu'en soit la cause, on a constaté que la lumière solaire possède la propriété de décolorer en partie les eaux. Cette action est probablement due à l'influence destructive de la lumière sur les parties organiques que les eaux contiennent.

En Amérique les eaux de ruissellement sont très colorées par des matières organiques en décomposition, et, dans ce pays, on cherche à diminuer cette altération par différents procédés que nous verrons par la suite.

Pour comparer la couleur de l'eau on peut s'adresser à la méthode d'Allen Hazen. On prend comme témoin une solution de chlorure platinico-potassique qu'on mélange à du chlorure cobalteux. On fait une série de gammes qu'on compare dans un colorimètre avec l'eau à examiner. Dans tous les essais il faut filtrer l'eau. Il ne faut pas confondre la couleur de l'eau avec le trouble ou turbidité. La couleur est due à des substances dissoutes, le trouble au contraire à des substances en suspension. Dans les eaux riches en chaux les matières organiques colorant l'eau sont coagulées et se déposent. Dans les eaux peu calcaires, ce phénomène ne se produit pas. Aussi cette altération est-elle très fréquente pour les eaux issues de terrains granitiques pauvres en calcaire.

Quand on tombe sur une assise lignitifère, les eaux sont colorées en noir par des matières humiques, généralement riches en produits de dissolution de la pyrite. Elles sont impropres à la consommation. On trouve un exemple de ce genre dans les dépôts tertiaires de l'Allemagne du Nord.

Turbidité. — L'eau pure doit être limpide. L'altération de sa transparence constitue un trouble ou un louche. Les images que l'on peut apercevoir à travers une eau limpide se voient alors plus difficilement. Si le trouble est trop prononcé, l'eau devient opaque.

La limpidité s'altère pour deux raisons : par l'engouffrement dans le sol d'eau trouble arrivant aux sources avec une filtration insuffisante ; ou encore par suite de l'augmentation brusque du débit des canaux souterrains, après une pluie par exemple. Celle-ci crée brusquement des remous qui favorisent la mise en suspension des dépôts que les diaclases renferment toujours. Nous avons pu vérifier cette dernière cause aux sources de l'Avre de la façon suivante. Le niveau de la source de Foisys, qui se trouble en hiver, est généralement maintenu surélevé au moyen d'une vanne. Le fond de la source est tapissé

d'un dépôt d'argile très fine. Dernièrement, ayant eu besoin d'abaisser le niveau de cette source, on ouvrit assez rapidement la vanne. Cette manœuvre suffit pour remettre en suspension l'argile déposée dans le fond de la source et pour troubler l'eau.

Ceci montre donc qu'une source ne se trouble pas seulement parce que le sol filtre insuffisamment, le trouble des eaux tient encore à une augmentation du débit due à des causes diverses qu'il convient de rechercher.

L'augmentation microbienne qui en résulte provient souvent des dépôts remis en suspension.

Certaines eaux limpides à leur sortie de terre deviennent louches parce qu'elles contiennent certains éléments, comme l'hydrogène sulfuré. Celui-ci, en s'oxydant à l'air, donne du soufre. De même, les sels de fer au minimum se transforment en oxyde ferrique.

Différents moyens ont été préconisés pour apprécier la turbidité : l'appareil de Regnard basé sur la sensibilité à la lumière du sélénium traversé par un courant électrique. On peut citer encore la méthode photographique de Forel, celle basée sur la combinaison de l'hydrogène et du chlore, laquelle est proportionnelle à l'éclairement; la méthode du capitaine Renard qui consiste à enfoncer dans l'eau une assiette en porcelaine blanche attachée à trois cordelettes. Cette assiette se voit d'autant plus profondément que l'eau est plus claire. Il y a encore la méthode employée en 1883 par la Société de physique et d'histoire naturelle au moyen d'une lampe électrique; la méthode gravimétrique qui consiste à peser le dépôt laissé sur les filtres après passage d'eau trouble.

Comme moyens pratiques on peut citer la méthode d'Allen Hazen et de G. Whipple. Ceux-ci prennent comme étalon de turbidité le chiffre 100 pour le trouble d'une eau contenant 100 milligrammes de silice par litre. Ce corps doit être dans un tel état de division qu'un fil de platine brillant, de 1 millimètre de diamètre, cesse d'être

aperçu quand il est placé à 100 millimètres de la surface de l'eau, l'œil étant placé à $1^m,20$ au-dessus du fil. L'opération doit être faite en plein air, vers le milieu du jour et à l'ombre.

L'eau doit être dans un vase assez large pour que les parois n'empêchent pas la lumière d'entrer et n'influencent pas les résultats.

L'eau à examiner et l'étalon doivent présenter le même trouble. On y arrive en diluant l'un ou l'autre d'une façon convenable au moyen d'eau distillée.

Le diaphanomètre d'Anthony repose sur les propriétés de la lumière polarisée. On cherche de combien il faut tourner un nicol mobile, par rapport à un nicol fixe, de façon à obtenir le même degré d'obscurcissement que celui obtenu au moyen d'une lumière venant de la glace de fond et ayant traversé une épaisseur déterminée de l'eau à examiner. La comparaison est obtenue au moyen d'un oculaire dont le champ est divisé en deux moitiés : d'un côté arrive la lumière ayant traversé l'eau, de l'autre celle venant des nicols.

Le tholomètre de Van den Brœck et Radir se compose d'un trèfle métallique émaillé en trois couleurs : blanche, grise et noire. On note les distances auxquelles ces trois couleurs s'éteignent successivement.

Saveur. — L'eau doit avoir une saveur agréable qu'on apprécie facilement à la dégustation. Quand sa saveur est sucrée, acide ou amère, il faut la soupçonner de recevoir des eaux étrangères et la suspecter. Quand elle a passé sur du cuivre ou du mispickel, elle a un goût métallique qui doit la faire rejeter.

Odeur. — L'eau doit être sans odeur. Flügge a indiqué le moyen facile de reconnaître celle-ci. On additionne l'eau avec un peu de lessive de potasse et on chauffe à 40°. On rince avec ce mélange une haute éprouvette et on sent celle-ci :

Ce procédé est très suffisant en pratique. M. Girardin

emploie l'acide iodique anhydre pour faire un dosage des odeurs de l'eau. Le plus souvent c'est une complication inutile.

On distingue comme odeurs des eaux :

L'odeur de paille, de foin, d'herbe, de terre, de tourbe, de marais, de moisi, de poisson, etc.

Certaines algues donnent à l'eau des odeurs désagréables.

Voici, d'après M. Imbeaux, les odeurs qu'elles fournissent :

Odeur aromatique donnée par les diatomées, *Asterionella*, *Cyclostella*, diatomées, etc.

Odeur d'herbe. — Cyanophycées et quelques diatomées (*Synedra*, *Melosora*).

Odeur de poisson. — Quelques Chlorophycées comme le Valvox et des protozoaires comme l'*Uroglena*, *Synura*.

A Brooklyn, chaque année à l'automne et au printemps les eaux prenaient une mauvaise odeur due à l'*Asterionella formosa*, algue silicicole.

A Boston, la *Synura* donnait une odeur de concombre.

Température. — Les eaux d'alimentation doivent êtres fraîches. La température la meilleure est comprise entre 5 et 18° C. Au-dessous de 5° l'eau peut amener l'irritation des muqueuses et est dangereuse. Au-dessus de 18° l'eau est fade et désagréable.

III

ESTIMATION DE LA NATURE DES EAUX QU'ON PEUT TROUVER DANS DIFFÉRENTS TERRAINS

Tout forage de puits demande une étude préalable qui permette de connaître la nature des eaux qu'on peut rencontrer dans la région.

Or, pour faire cette étude aussi rapide et aussi simple que possible, il faut s'adresser aux puits et sources existants. Voici comment nous avons l'habitude d'opérer.

En campagne le puits d'une ferme ou d'une habitation quelconque est creusé dans une cour. Celle-ci, généralement fort sale, reçoit les fumiers et les purins qui s'infiltrent dans le sol, ainsi que les urines s'écoulant des fosses d'aisances non étanches. Tous ces liquides, provenant des excrétions animales et humaines, sont riches en sel marin, par conséquent en chlore. Ils arrivent dans la nappe et viennent contaminer les eaux souterraines. L'eau d'un puits, ainsi souillée par les fosses d'aisances ou les fumiers, a une composition très différente de celle des eaux qu'on peut trouver dans ces terrains. Pour une étude de ce genre, on élimine tous les puits ainsi contaminés en dosant le chlore. Dans la nappe souterraine, cet élément ne provient pas uniquement de l'infiltration des urines ou du purin. Les eaux de source non contaminées en renferment une dose variable avec le gisement géologique. Il faut connaître au préalable cette dose normale de chlore. Toutes les fois qu'un puits en renfermera une quantité supérieure à la normale, on soupçonnera une infiltration par un liquide d'origine animale. La quantité de chlore qu'une eau renferme normalement est obtenue en dosant cet élément dans les sources les plus importantes sortant du gisement où le puits sera foré. On prend la moyenne des résultats obtenus, si ceux-ci ne sont pas trop divergents. A défaut de sources on utilise les puits dans lesquels on pompe de l'eau en abondance (laiterie, brasserie, sucrerie).

Ceci établi, on fait une solution de nitrate d'argent à un titre tel que 1 centimètre cube de cette solution ajouté à 50 centimètres d'eau d'un puits contenant 3 gouttes d'une solution de chromate de potassium à 10 p. 100, donne un précipité ou une coloration rouge brique, quand les eaux contiennent moins de chlore que

la dose moyenne trouvée augmentée de 2 milligrammes par litre. Ainsi par exemple dans la craie sénonienne du côté de Sens, on trouve que les eaux des sources contiennent 6 milligrammes de chlore par litre. On s'arrange pour que la solution de nitrate d'argent donne encore une légère coloration rouge dans les eaux contenant $6 + 2 = 8$ milligrammes de chlore par litre. Cette méthode d'investigation est très rapide. On élimine toutes les eaux qui, avec la solution de nitrate d'argent, donnent un précipité blanc caillebotté, c'est-à-dire qui semblent contaminées par les infiltrations de liquides suspects.

Sur un périmètre d'alimentation on trouve souvent que 80 p. 100 des puits sont ainsi contaminés. L'étude portera donc sur un ensemble de quelques puits généralement assez disséminés.

L'examen des eaux des puits non contaminés doit être très sommaire.

L'analyste qui aura à les examiner y dosera d'une façon précise le chlore, les nitrates (1) et en déterminera la résistivité électrique à 18°.

Les résultats obtenus seront inscrits sur une carte d'état-major en face des endroits où les prises ont été faites (2).

Ceci établi on examine comment les résistivités se répartissent. Par cette méthode on peut connaître les points où il y aurait avantage à creuser un puits de pré-

(1) Les nitrates peuvent provenir de la nitrification de matières organiques végétales pauvres en chlore. Ils fausseront les résultats de la résistivité électrique. C'est pourquoi on doit doser cet élément et en chercher, comme pour le chlore, la dose normale.

(2) Si on ne disposait pas d'un nombre suffisant de puits, on prendrait une partie de ceux qui sont les moins contaminés. Dans ce cas la résistivité électrique doit être corrigée de la façon suivante :

$$\text{RE corrigée} = \text{RE trouvée} + \frac{\text{RE}}{180} \times (n + n')$$

formule dans laquelle RE représente la résistivité électrique.

n la quantité de chlore dépassant la moyenne admise.

n' la quantité d'azote nitrique dépassant la moyenne admise.

férence à un autre. Par exemple il arrive que sur un périmètre déterminé il soit préférable d'avoir un puits donnant des eaux peu riches en sels de chaux. Or celles-ci se trouveront dans les régions où la résistivité électrique est la plus grande. Si quatre puits assez voisins ont une résistivité identique, on a des chances de trouver dans l'intérieur de ce quadrilatère une eau de composition à peu près identique. En un point donné, si les quatre puits qui l'entourent ont une résistivité différente, on fait la moyenne des quatre conductibilités trouvées, c'est-à-dire qu'on pose :

$$\frac{1}{RE} \text{probable} = \frac{1}{4}\left[\frac{1}{RE_1} + \frac{1}{RE_2} + \frac{1}{RE_3} + \frac{1}{RE_4}\right]$$

Connaissant cette résistivité moyenne, on choisit à la base d'un gisement identique, l'eau d'une source ayant même résistivité. Son analyse permet de connaître très approximativement la composition des eaux qu'on se propose de capter.

Dans les terrains renfermant du sulfate de chaux ou encore des gisements de sel marin comme l'étage salifèrien du Lias, cette méthode ne donne pas toujours de bons résultats, parce que généralement le sulfate de chaux ou le sel marin sont très localisés et les eaux souterraines sont loin d'avoir, pour une petite portion du périmètre, une composition uniforme.

On ferait la même remarque pour la magnésie. Quand, dans le cas de gisements riches en sulfatë de chaux les quatre puits entourant le point choisi pour faire un forage quelconque ont des résistivités électriques disparates, on devra éviter de faire une moyenne des quatre résultats obtenus. Pour déterminer la composition probable de l'eau qu'on désire capter on opérera ainsi.

Soit A, B, C, D les quatre puits en question et X le point choisi pour faire un forage. La direction de la flèche indique la direction générale des eaux dans ces

terrains. A la base du gisement mais pas trop loin de X on suppose qu'on rencontre un certain nombre de sources S, S_1, S_2, S_3, etc.

Admettons que la résistivité électrique de S soit très sensiblement celle du puits B, celle de S_1 celle de A, enfin celle de S_3 celle de D.

On admettra, comme très probable, que la composition des eaux en X doit être très sensiblement celle de S_2.

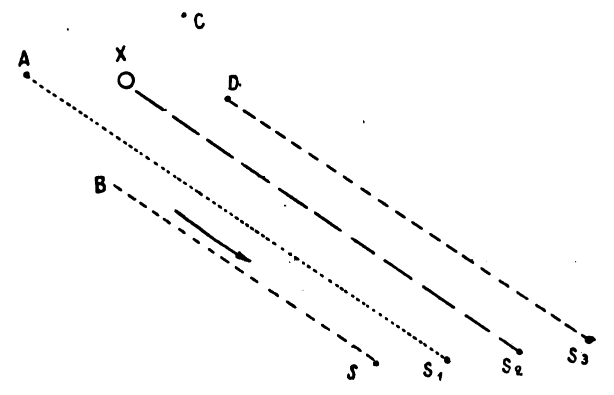


Fig. 73. — Détermination approximative de la qualité de l'eau d'un puits à forer.

La question se complique beaucoup quand le terrain est parcouru par des failles parce que celles-ci peuvent drainer des eaux de différents terrains. La composition chimique des sources S, S_1, S_2, etc., représente généralement un mélange de différentes eaux. Pour élucider ce problème l'emploi du thermomètre est à recommander. Mais la méthode demande un temps assez long. Voici comment on opère. Dans le cours d'une année on prend la température deux ou trois fois en A, B, C, D, et dans S, S_1, S_2, S_3, etc., particulièrement à deux périodes différentes, une en décembre, l'autre en juillet. Pour

chaque puits, on fait la moyenne des résultats obtenus qu'on compare à la température moyenne des sources.

Dans le cas où il se produit des eaux ascendantes par l'intermédiaire des failles, on trouve une différence de température très nette entre les sources et les puits, si ces derniers sont sans relation avec une faille.

Toutes les fois que la température des sources sera plus élevée de au moins 1 à 2° sur celle des puits observés, on ne pourra employer la méthode de comparaison que nous préconisons parce que les puits et les sources reçoivent des eaux différentes.

Dans ce cas, si on tient à bien connaître la composition préalable de l'eau qu'on désire capter, on comparera tous les puits du périmètre de façon à se placer de préférence dans la région où quatre puits assez voisins, situés dans la région susceptible de fournir le plus d'eau, donnent, au point de vue de la minéralisation, des résultats identiques et les meilleurs.

La même méthode est à préconiser pour un puits artésien si on peut trouver, entourant le point choisi, quatre puits artésiens creusés dans le même terrain. Cela se trouve très rarement. Il y a lieu, en l'absence de puits artésien, de considérer deux cas : celui d'une eau peu profonde, et celui d'une eau profonde.

Lorsque l'eau est peu profonde la composition moyenne des eaux artésiennes est à peu près celle des eaux de son périmètre d'alimentation. Il suffira de connaître ce périmètre et d'analyser sommairement, comme plus haut, les eaux des sources qui en sortent. A défaut de sources on s'adressera aux puits non souillés par les infiltrations des purins. Quant à leur température, on pourra l'évaluer suffisamment si on connaît approximativement l'altitude de la couche renfermant les eaux artésiennes et en admettant la loi d'accroissement de 1° par 33 mètres de profondeur.

Les eaux artésiennes des nappes très profondes sont

pour la plupart riches en sels ferreux, quelquefois même en hydrogène sulfuré.

Il est impossible de déterminer à l'avance leur composition. On sait seulement, qu'en général, elles sont très minéralisées.

En agriculture ces eaux ne donnent pas toujours satisfaction et il est très rare qu'on cherche à les capter à cause de leur température. On préfère de beaucoup les nappes artésiennes peu profondes et dont les eaux ont une température suffisamment froide.

De la variation de composition chimique des eaux. — La composition d'une eau doit pour certaines industries comme la brasserie, rester absolument constante. La qualité du brassage dépend de la composition de l'eau employée. Une eau qui varie de composition ne faciliterait guère cette opération.

Il est donc utile de connaître si les eaux qu'on désire capter éprouvent des variations importantes de composition.

Ici encore la conductibilité électrique sera très utile parce qu'elle n'exige pas une longue manifestation et donne des renseignements très rapides.

Toute variation de la résistivité électrique des sources (1) a une cause et il importe de la connaître.

(1) Voici en effet ce qui se passe. Les eaux de pluie s'infiltrent d'abord dans la partie du sol occupée par la culture. Elles y rencontrent des sels en quantité variable selon la saison (apport d'engrais, nitrification plus ou moins active) qu'elles dissolvent en partie. Supposons que pendant un trimestre, il s'infiltre un volume v d'eau de pluie contenant par litre a grammes de sels divers dissous dans la partie supérieure du sol. Continuant sa marche descendante, ce volume v d'eau de pluie se trouvera en contact avec un volume v' d'eau d'imprégnation de la roche, laquelle contient b grammes de sels divers. Les phénomènes de diffusion et d'osmose permettront un échange de sels entre ces deux eaux. Si le contact est suffisamment long, il arrivera un moment où la composition de l'eau infiltrée et celle de l'eau d'imprégnation sera identique et égale à $\frac{va+vb}{v+v'} = A$ grammes de sels. L'eau de pluie gagne ensuite la nappe souterraine où elle se mélange plus ou moins intimement avec un volume V d'eau renfermant B grammes de sels divers. La composition du mélange sera

Nous avons déjà dit qu'une eau souterraine pouvait, par exemple dans les terrains calcaires, changer de composition à la suite d'un orage plus ou moins localisé.

Quelquefois cette résistivité ne varie guère que de 50 à 100 ohms au maximum, ce qui correspond à 2 ou 4 milligrammes de chaux. De si faibles variations n'ont pas une importance considérable pour la fabrication de la bière par exemple. Mais elles sont toujours suivies d'une recrudescence microbienne qui nuit à la qualité des eaux potables ou encore à celle des eaux servant aux lavages d'ustensiles en laiterie ou en vinification.

Quelquefois la résistivité augmente après les pluies de 1 000 ou 2 000 ohms. Ce qui correspond à une diminution de 40 à 45 milligrammes de chaux par litre, c'est-à-dire à une variation considérable de la composition chimique. En même temps elles deviennent louches ou troubles. C'est un grand inconvénient pour certaines industries telles que la brasserie et la laiterie qui préfèrent ne se servir que d'eau très limpide.

Pour suivre la variation de composition des eaux souterraines après les pluies, il est préférable de faire cette étude sur les sources mêmes qui sortent du gisement géologique où on doit prendre de l'eau. On ne s'adressera aux puits voisins que s'ils sont établis sur un courant souterrain ou que l'on y pompe une très grande quantité d'eau.

Toutes les fois que les sources d'un gisement géologique varieront de composition chimique au moment des pluies, il y aura lieu de craindre les mêmes change-

égale à $\frac{vA + VB}{v + V} = C$ grammes de sels. Si le volume d'eau de la nappe (V est très grand par rapport à v, on voit par cette égalité que C sera très sensiblement égale à B, dans une limite inférieure aux erreurs d'expérience. Il faut en outre que l'eau reste un temps suffisant dans le sol pour permettre aux phénomènes de diffusion et d'osmose de s'accomplir entièrement. Sinon l'arrivée d'eau de pluie se traduit par une variation de la minéralisation des sources, c'est-à-dire de résistivité électrique.

ments pour les eaux des puits du même gisement.

Les variations de composition tiennent encore à des changements dans le régime souterrain. Ainsi, à la suite d'un éboulement dans l'intérieur d'une diaclase souterraine, une partie de l'eau qu'elle draine est arrêtée momentanément. Une source alimentée par l'eau de plusieurs diaclases de composition non identique, éprouvera aussi une variation dans sa composition. L'effet de ces variations ne dépasse guère généralement 20 à 40 ohms, c'est-à-dire est de l'ordre du milligramme de chaux (1).

Les variations de composition dues à des phénomènes d'hydrologie souterraine se produisent à toute époque. C'est au moment de la saison sèche qu'on peut le plus certainement les soupçonner.

Il est évident que, pour toutes les exploitations où on recherchera une régularité de composition des eaux, il faudra s'abstenir d'aller faire un captage là où les sources éprouvent également de très fortes variations (2).

(1) Dans la région de Sens nous avons rencontré des sources dont la résistivité varie de 400 ohms, soit de 10 à 15 milligrammes de chaux, par suite de changements dans leur régime souterrain. Ce cas est exceptionnel. Ces sources sont alimentées en hiver par deux eaux de résistivités bien différentes. En été une seule de ces eaux les alimente.

(2) Les tremblements de terre modifient la composition et la température des sources. M. J. François a montré que les sources de Louèche ont gagné 7° et augmenté de débit à la suite du tremblement de terre de 1855 qui dévasta la vallée du Rhône.

Hervé-Mangon a montré également que les secousses sismiques de l'Europe occidentale augmentent la quantité de sédiments fournis par le puits artésien de Passy.

Généralement, les effets des tremblements de terre se font sentir plus particulièrement sur les sources profondes. Il y a lieu de penser que les sources superficielles n'y sont pas tout à fait insensibles.

Ainsi, en Asie Mineure, les sources alimentant Brousse furent taries après un tremblement de terre en 1855, les sources thermales augmentèrent de débit. Au bout d'un mois l'état primitif se rétablit.

IV

RECHERCHES DES CONTAMINATIONS POUVANT ATTEINDRE LES EAUX QU'ON SE PROPOSE DE CAPTER.

Lorsqu'il s'agit de pourvoir en eau potable une forte agglomération, on est à peu près certain d'avoir des eaux exemptes de contaminations, en s'adressant à des sources ou à des puits situés dans la montagne. Malgré la perméabilité en grand de la roche, elles sont les plus pures, par suite de l'absence d'agglomérations humaines et de cultures intensives sur leur bassin d'alimentation. Il en est de même si les eaux à capter sortent de sous une forêt inhabitée (1). En dehors de ces deux cas particuliers, il faut rechercher si les eaux sont contaminées

On a généralement coutume d'attendre que le puits soit fait pour apprécier la qualité de ses eaux. Cette méthode n'est nullement rationnelle, elle est même onéreuse si les eaux sont reconnues mauvaises, et on a fait de nombreuses dépenses en pure perte. Lorsque les eaux à capter sont susceptibles de recevoir des eaux de rivière infiltrées à travers des bétoires, elles peuvent être souillées par les déjections provenant de fosses d'aisances installées sur le bord de la rivière. Celle-ci reçoit encore les eaux de lavoirs, et souvent les eaux usées provenant d'égouts des villes ou d'exploitations industrielles. Les eaux souterraines peuvent être également contaminées par des infiltrations de fosses d'aisances et de purin ou encore par celles des cimetières.

Il s'agit, avant captage, de connaître ces causes de contamination et de rechercher le moyen d'y remédier.

Quand on est presque sur le faîte d'un périmètre et à

(1) Si la forêt n'est pas habitée par l'homme, elle l'est par les animaux de toutes espèces. On ignore encore si les maladies de ces derniers se transmettent à l'homme par l'eau.

la sortie d'une forêt, il suffit de connaître la direction générale des eaux. Si, à l'amont, il n'y a ni culture ni maison, on pourra déclarer que les eaux à capter seront exemptes de contaminations dangereuses.

On a le plus souvent à traiter le cas général d'un puits à installer dans une région habitée ou cultivée.

Admettons qu'on connaisse, par l'emploi des méthodes indiquées précédemment, le régime hydrologique de la région. A la suite des pluies, tous les germes nocifs déposés sur le périmètre, à l'amont du point étudié, peuvent être entraînés dans la nappe souterraine. Supposons que la filtration soit insuffisante pour arrêter la marche souterraine de ces germes dangereux. L'installation d'une ville sur le périmètre, à l'amont du point choisi, rend alors la qualité des eaux à capter très suspecte.

Or l'analyse chimique, la résistivité électrique seules ne permettent pas d'apprécier l'épuration des eaux contaminées par le sol. Peu nous importe de connaître le moment où celles-ci arrivent aux sources si le sol a fait disparaître la contamination et les a rendues inoffensives.

Il faut rechercher le degré d'épuration du sol, lequel se mesure assez bien par les procédés bactériologiques.

Nous estimons inutile de faire de nombreuses et longues analyses microbiennes.

L'expérience a montré qu'il suffisait de porter presque exclusivement les investigations sur une espèce simple, facile à déceler et dont l'analyse est très rapide.

On a l'habitude de rechercher le *B. coli communis*, très commun dans l'intestin de l'homme et des animaux. Il est également fréquent à la surface de la terre. La présence de ce germe n'indique pas exclusivement une infiltration de fosse d'aisance ou de purin mais encore que des eaux superficielles ont pu ou peuvent arriver aux nappes souterraines insuffisamment épurées.

Au contraire une recrudescence microbienne, de même que la turbidité, indiquent bien une infiltration d'eau

de surface et une mauvaise filtration. Elle peut indiquer également un remous dans l'intérieur de canaux souterrains mettant en suspension les microbes en même temps que les dépôts argileux déposés, comme nous l'avons vu précédemment, dans le fond de ces courants. Le B. coli (1) vit peu de temps dans l'eau et constitue une espèce très rare dans ces dépôts.

L'analyse quantitative de ce germe ne demande que quarante-huit heures; il faut plus longtemps pour faire une numération microbienne.

Quoi qu'il en soit, les eaux superficielles et les infiltrations de purin ont toujours du *B. coli communis*. Si les sources qui les reçoivent n'en renferment pas, on peut admettre que l'épuration souterraine est suffisante. Au contraire, si, après les pluies, ces eaux en possèdent un plus grand nombre, c'est que l'épuration par le sol y est insuffisante.

La recherche de ce microbe répond bien aux *desiderata* indiqués plus haut. C'est aussi sa seule signification. Tous les procédés d'analyses, quels qu'ils soient, ne peuvent arriver qu'à déceler des contaminations d'ordre très général. Nous ferons une exception pour le cas où le débit de la source est très faible, comme nous allons le voir au chapitre suivant.

Si, de l'étude faite sur les sources ou puits de la région, on trouve peu après une pluie, une augmentation du *B. coli communis*, il faudra craindre que les purins et les fosses d'aisances, situés à l'amont du point où on veut faire un puits, arrivent sans épuration à la nappe souterraine et la contaminent.

Les moyens de remédier à ces contaminations seront étudiés plus loin.

Une petite exploitation est très souvent dans l'impossibilité de procéder à ces recherches. Les expériences faites jusqu'ici dans les différents terrains montrent que, très

(1) On peut rechercher également le *bacillus lactis aerogenes*.

souvent, l'épuration des eaux est insuffisante dans les terrains perméables en grand, surtout pour celles dont la résistivité électrique varie après les pluies.

Elle est meilleure dans les terrains meubles des pentes, les alluvions. Elle est excellente dans les sables calcaires. Ces résultats suffiront, sans faire d'expériences, pour fixer les idées d'un petit propriétaire sur le degré d'épuration possible des eaux qu'il peut capter.

Soit un terrain dans lequel l'épuration des eaux a été reconnue insuffisante.

La détermination du périmètre d'alimentation et l'examen sur place conduira à soupçonner les fosses et les purins qui peuvent contaminer la nappe souterraine qu'on se propose de capter.

Nous connaissons certaines régions où les eaux contaminées d'un village tombent directement sur le courant souterrain alimentant une source située à 4 kilomètres de là. Cette eau sert à l'alimentation d'une ville. Elle n'a pas jusqu'ici donné de fièvre typhoïde, parce que le village en question n'a pas renfermé le moindre cas de fièvre typhoïde. C'est donc un bel exemple de la théorie préconisée par notre maître M. Duclaux, que les eaux potables ne sont véritablement dangereuses que là où elles reçoivent des germes jeunes et virulents de typhiques et de cholériques. Pour une très petite exploitation et si on a tout lieu de penser qu'on ne se trouvera pas directement sur un courant souterrain, on peut creuser le puits à l'aval de fumiers ou de purins situés à au moins 100 mètres de distance. Dans ce cas les contaminations mettent un certain temps pour aller rejoindre la diaclase qui peut alimenter le point choisi et deviennent moins dangereuses. On recommande que les fumiers ou purins ne soient pas placés directement au-dessus du puits dans la direction de la ligne de pendage parce que c'est le plus souvent suivant cette direction que l'arrivée des contaminations est le plus rapide.

Mais si véritablement le puits a des chances d'être situé sur un courant important, ou dans son voisinage immédiat, cette eau n'est potable que si, sur le périmètre, il n'y a aucun malade typhique ou cholérique.

Dans ces conditions il faut être au courant de l'état sanitaire des villages dont les eaux sauvages, après lavage des rues et des fermes, viennent s'engouffrer dans le sol. Elles y apportent les germes nocifs qui contamineront les eaux du courant souterrain.

Il n'est pas toujours aisé à un particulier, ou même à une petite ville, de faire surveiller la santé des habitants des maisons situées en amont d'un captage, et même de faire prendre aux malades les précautions de prophylaxie nécessaires pour empêcher l'extension de la maladie.

Comme il n'est pas toujours possible de prendre des eaux là où elles sont les plus pures, il faut utiliser celles dont on dispose. Si la région du périmètre est très peu habitée, on admet que les cas de fièvre typhoïde y sont très rares, souvent nuls. Une enquête médicale préalable renseigne sur ce point. Pour les quelques cas qui se produisent les germes jeunes et virulents ont le temps de se détruire avant d'être ingurgités par les organismes. Quand une épidémie se déclare en un point amont, il est très rare qu'on n'en soit pas averti dans le voisinage, et à ce moment il est utile de procéder, momentanément du moins, à leur stérilisation. Mais si le périmètre est très peuplé ou bien occupé par une ville importante il faut renoncer à utiliser l'eau aux besoins de l'alimentation sans stérilisation préalable.

Quand on désire creuser un puits dans un terrain perméable en petit, il faut éviter malgré le pouvoir épurant du sol, les contaminations immédiates. On réserve autour du puits une zone dont le diamètre est double de la profondeur probable de rencontre de l'eau.

En résumé, on peut, par comparaison avec les sources et les puits voisins du lieu qu'on s'est choisi, soupçonner

les contaminations possibles des eaux souterraines en ce point et remédier quelquefois avant tout forage aux inconvénients entrevus. En faisant cette étude au préalable, on évitera souvent de nombreux aléas après le captage.

V

RECHERCHES DES CONTAMINATIONS DANS LES EAUX DÉJA CAPTÉES

Il arrive quelquefois qu'un puits existant ou une source peuvent être utilisés pour l'alimentation d'une exploitation ou d'une agglomération importante. Avant de faire certains frais d'aménagement, il est utile de connaître l'importance des contaminations qui viennent dans ce puits ou à cette source. Les méthodes d'investigation indiquées au chapitre précédent s'appliquent également dans ce cas.

Pour ces recherches, l'analyse chimique n'est qu'un guide. Il est souvent plus utile d'examiner sur place les causes plus ou moins multiples de contaminations.

Considérons, par exemple, une diaclase capable de donner libre cours à un petit ruisseau souterrain débitant deux litres à la seconde. Soit une ferme de moyenne importance dont les purins ou les fumiers s'infiltrent à peu près entièrement dans le sol. On évalue à 10 litres par jour au maximum le volume de liquide résiduaire qui peut contaminer la diaclase. Comme il contient 5 grammes de chlore par litre, il arrive aussi en vingt-quatre heures 50 grammes dans le sol.

Un volume de 2 litres à la seconde représente 172800 litres en vingt-quatre heures.

Ces 50 grammes de chlore se dilueront donc dans 172 800 litres d'eau, soit pour un litre une augmentation de $\frac{1}{3}$ de milligramme. L'analyse chimique ne peut

pas doser une si minime augmentation de chlore. La contamination ne serait sensible que si le débit de la diaclase n'était que de 2 litres à la minute. L'analyse chimique la décèlerait alors très facilement.

Cet exemple suffit donc à montrer que l'analyse chimique ne peut guère servir que pour déceler les contaminations de courants de faibles débits. Pour les courants importants il peut y avoir contamination malgré les conclusions favorables de l'analyse chimique.

Reprenons le cas de ce village dont les infiltrations viennent souiller un courant souterrain allant directement à une source alimentant une ville.

Si un malade typhique par exemple existait dans le village, le courant pourrait recevoir les selles de ce malade. A ce moment l'analyse donnerait toujours de très bons résultats et cependant ces eaux seraient dangereusement contaminées.

Pour apprécier la qualité de l'eau d'une source ou d'un puits, on doit connaître son périmètre d'alimentation, suivre les variations de la résistivité électrique de leurs eaux et rechercher le degré d'épuration que le sol peut faire subir aux eaux infiltrées et contaminées.

C'est le programme suivi dans le précédent chapitre. Quand on opère sur un puits, on fait un appel constant d'eau. On se place ainsi dans des conditions comparables au régime futur de l'exploitation.

Comme nous venons de le dire, l'analyse chimique est utile quelquefois pour déterminer les causes de contaminations d'une source de très petit débit ou d'un puits. Pour les puits nous distinguerons deux cas :

Premier cas : Un courant souterrain parcourt le puits de part en part. — On peut assimiler ce puits à une source souterraine. L'analyse chimique de l'eau prélevée à un moment donné donnera de très utiles renseignements si le débit du courant est faible. La présence d'un courant souterrain se reconnaît de plusieurs façons. On peut

descendre au fond du puits et s'assurer que l'eau y est animée d'un certain mouvement. On se sert de flotteurs de surface ou de flotteurs lestés. Ces derniers s'enfoncent de 10 ou 15 centimètres dans l'eau, et sont terminés à leur base par des brindilles de fils ne touchant pas le fond du puits. S'il y a circulation d'eau à une certaine profondeur, on constate que les brindilles de fil quittent la position verticale due à leur pesanteur et prennent une direction oblique. Les flotteurs de surface et le flotteur lesté se déplacent quand le courant se manifeste à la surface de l'eau. Au lieu de flotteurs on emploie encore les matières colorantes. Sur un bâton on dépose de la fluorescéine en poudre. On introduit celui-ci verticalement dans l'eau du puits. S'il y a courant, on voit des traînées de fluorescéine se produire dans le sens du courant et à la profondeur où il se manifeste.

Ces moyens exigent une descente dans le puits, qu'on évite de la façon suivante.

On jette le soir dans le puits une certaine quantité de fluorescéine (2 milligrammes par mètre cube d'eau contenu dans le puits). On mélange bien le tout par agitation. On prélève immédiatement un échantillon. Le lendemain matin, avant tout pompage, on prélève un deuxième échantillon après avoir bien remué l'eau du puits. Les trois quarts au moins de la matière colorante doivent avoir disparu s'il y a un courant souterrain. On se rend compte de cette disparition en mélangeant le témoin prélevé la veille au soir avec trois fois son volume d'eau. En comparant au fluorescope ces deux échantillons d'eau, c'est le témoin ainsi dilué qui doit encore apparaître le plus coloré.

La prise pour l'analyse chimique doit être faite en principe dans la zone où le courant se fait sentir. En pratique, on se contente de puiser à égale distance de la surface de l'eau et du fond du puits. Les contaminations constatées par l'analyse chimique peuvent être voisines

ou éloignées du puits. Il est utile de savoir où elles se trouvent. On note tous les points qui peuvent contaminer l'eau (fumiers, purins, puisards, fosses d'aisances, cimetières, etc.), et on s'assure de leur relation avec l'eau du puits contaminé par des expériences à la fluorescéine et par une technique que nous allons bientôt indiquer.

Deuxième cas : Le puits n'est pas placé directement sur le courant souterrain. — Dans ce cas, on pourra quelquefois distinguer à l'analyse chimique si une contamination est à proximité ou à quelque distance du puits.

En effet, l'eau d'un tel puits ne se renouvelle que quand, par pompage, on provoque un appel d'eau du courant souterrain. Admettons qu'on ne pompe pas pendant quelques jours. L'eau du puits est stagnante. S'il y a une contamination très proche, elle s'enrichira progressivement des liquides suspects infiltrés dans le sol. Deux prises d'eau faites à quelques jours d'intervalle accuseront alors une richesse différente en sels. La plus récente sera aussi la plus minéralisée. Si cette infiltration est lente et de très peu d'importance, la deuxième prise devra être faite après un intervalle de temps suffisant pour que son enrichissement en sels soit sensible à l'analyse.

Nous verrons au chapitre suivant comment, par un pompage méthodique on peut arriver à déceler la zone d'origine d'une contamination située à quelque distance d'un puits.

MM. Ogier et Bonjean donnent, dans leur article du traité d'hygiène de MM. Brouardel et Mosny, un exemple de l'utilité des pompages prolongés pour prélever l'eau nécessaire aux analyses chimique et bactériologique d'un forage afin d'en estimer la qualité.

Éléments recherchés par l'analyse chimique pour déterminer une contamination. — Les liquides organiques suspects apportent avec eux des chlorures, des sulfates, des phosphates, de la chaux et de la magnésie,

des matières organiques. L'eau souterraine non contaminée contient de l'oxygène, de l'acide carbonique, des chlorures, des sulfates, rarement des phosphates, des nitrates, de la chaux, de la magnésie, des sels alcalins, différents métaux (fer, alumine, etc.), des sulfures quelquefois et des matières organiques, c'est-à-dire la plupart des éléments apportés par les liquides suspects mais en bien plus faible proportion.

L'arrivée de liquides organiques suspects dans une eau non contaminée provoquera une augmentation en chlorures, sulfates, phosphates, chaux, etc. Pour apprécier ces contaminations, il est désirable de connaître la composition des eaux qui sortent du sol, sans être contaminées. Nous avons vu précédemment que les contaminations ne se manifestent guère à l'analyse chimique de l'eau des sources débitant au moins 5 litres d'eau à la seconde. Ce sont elles qu'on analysera pour obtenir la composition des eaux non contaminées. Si on a fait plusieurs analyses on note les plus fortes doses trouvées pour chaque élément recherché.

On peut remplacer les sources par les eaux de forages ou de puits dans lesquels on pompe en moyenne un débit minimum de 5 litres à la seconde.

Les éléments dosés n'ont pas tous la même importance.

Résistivité. Extrait sec. — Prenons pour commencer la résistivité électrique. Quand elle est inférieure de 500 ohms à la plus faible résistivité trouvée pour les sources du périmètre, elle est suspecte, l'abaissement constaté dépendant à peu près certainement d'infiltrations superficielles de nature organique.

L'extrait sec ne doit pas être supérieur de 25 milligrammes au poids du plus fort extrait trouvé dans l'ensemble des sources. Quand il dépasse 500 milligrammes par litre, sauf pour les eaux minérales, le puits est suspect.

Chlore. — Tous les liquides organiques d'origine ani-

male sont riches en chlore. Si on trouve que l'eau d'un puits renferme 2 milligrammes de chlore en plus de la dose maxima trouvée pour les sources du périmètre, ceci indique certainement l'arrivée plus ou moins rapide d'eau superficielle, riche en détritus organiques d'origine animale, sauf dans les terrains du lias (étage salifé-rien) contenant naturellement des lentilles de sel marin. Mais cette eau peut avoir filtré à travers le sol. Les chlorures, comme les nitrates, ne sont pas retenus par le sol. Si une infiltration se produit depuis très longtemps, on constatera une arrivée d'eau riche en chlorures mais très pauvre en germes. Toutefois il y a lieu de se méfier, car une eau riche en sel marin est également riche en matières organiques. Celles-ci permettent la multiplication des germes suspects et annihile les effets de la filtration que nous étudierons plus loin.

Matières organiques. — La matière organique a deux origines : l'une est végétale, l'autre animale. Par elles-mêmes ces matières organiques n'ont aucune influence sur l'organisme humain, mais elles servent de véhicule et de bouillons de culture aux microbes. En trop grande quantité dans une eau, on prétend qu'elles favorisent l'ictère et les diarrhées. Cette opinion serait à vérifier.

La matière organique d'origine végétale provient de la surface du sol sur laquelle les eaux de pluies trouvent des bois ou des feuilles en décomposition. Elle peut également avoir une origine souterraine dans les lignites. Celles-ci se sont formées par la décomposition d'organismes végétaux déposés en même temps que certaines couches sédimentaires. Les eaux des sables du Soissonnais renferment quelquefois des substances organiques ayant cette origine.

La matière organique d'origine végétale n'apporte pas avec elle de microorganismes suspects. En petite

quantité elle ne rend pas l'eau impotable, en grande quantité on admet qu'elle est nuisible.

On doit la distinguer de la matière organique animale provenant des fèces, des purins, de l'urine. Celle-ci peut véhiculer des germes suspects et ne doit pas être tolérée (1).

La distinction porte sur le dosage du chlore. Quand l'augmentation de la matière organique et du chlore a lieu parallèlement, on peut être assuré qu'il y a quelque part une infiltration suspecte. Les matières végétales ne contenant pas de chlorure ne peuvent produire le même effet.

Pour l'industrie agricole, l'eau ne doit pas être riche en matières organiques. En brasserie, par exemple, on a reconnu que les eaux riches en cet élément favorisaient le développement ultérieur des germes nuisibles.

Contrairement à ce qui se passe pour les chlorures, les matières organiques se transforment dans le sol.

Sous l'influence des ferments nitreux et nitrique les matières contenant de l'azote se transforment en azote nitrique, en azote nitreux et en ammoniaque.

L'analyse pourra déceler une augmentation en azote nitrique et non en matières organiques. Il suffit qu'entre la surface du sol et la nappe souterraine les eaux aient subi un contact suffisant avec le sol pour permettre à la matière organique de se transformer en acide nitrique.

Azote nitrique. — L'azote nitrique indique une rétrogradation de la matière organique et un commencement d'épuration. Les microbes n'aiment guère les eaux riches en azote nitrique et préfèrent de beaucoup la matière organique. On constate que la filtration est plus facile dans un liquide pauvre en matière organique que dans celui où elle est abondante.

Une certaine richesse de l'eau en nitrate donne à

(1) Ces matières organiques sont souvent accompagnées de vers intestinaux très nuisibles à la santé.

celle-ci un goût très agréable avec une sensation de fraîcheur. Une dose de 2 à 5 milligrammes d'azote nitrique par litre est suffisante dans une eau. Certaines nappes phréatiques, à faible écoulement, contiennent des eaux pauvres en chlore mais contenant plus de 5 milligrammes d'azote nitrique. Elles sont, souvent, exemptes de contaminations. Dans les eaux employées en distillerie l'azote nitrique doit être faible parce qu'il est nuisible et empêche la marche normale de la fermentation.

Azote nitreux. — Une nitrification incomplète donne de l'azote nitreux au lieu d'azote nitrique. On admet très souvent que cette action incomplète tient à un défaut de filtration. C'est exact dans certains cas, mais on a oublié que l'azote nitrique pouvait revenir azote nitreux par un phénomène de réduction très fréquent dans le sol. Nous avons montré (1) que dans de nombreux endroits les roches contiennent une eau d'imprégnation très riche en azote nitreux. Il ne faut pas attribuer à cet élément une importance qu'il ne peut avoir. On trouve de l'azote nitreux dans les eaux exemptes de germes suspects. Comme certains germes nocifs sont susceptibles de transformer l'azote nitrique en azote nitreux, on avait cru attribuer exclusivement à ces derniers l'origine de ce corps dans le sol. Cette opinion est fausse.

Ammoniaque. — Tout autre est la signification de la présence de l'ammoniaque. Ce corps se forme sous l'influence des ferments de la putréfaction et précède toute nitrification. On admet qu'il représente une décomposition récente de matières organiques ou une nitrification difficile. Comme il peut servir de nourriture aux germes nocifs et faciliter leur multiplication, sa présence est une présomption de mauvaise filtration. Toutefois l'eau des forages contient assez souvent de l'ammoniaque due à l'oxydation du tube en fer des forages. Ceux-ci,

(1) F. Diénert, Sur la présence de l'azote nitreux dans les eaux des sources (*Revue d'hygiène*, 1903).



comme on le sait, dégagent du carbonate d'ammoniaque. On devra alors, dans tout autre cas, considérer l'eau comme suspecte quand elle renferme de l'ammoniaque.

Phosphates. — Quelques terrains contiennent naturellement des phosphates, à l'état de phosphate de chaux, de fer et d'alumine. Il n'est donc pas étonnant de trouver des sources qui en renferment normalement une certaine proportion. L'étude préalable de ces émergences renseignera sur ce sujet. Mais quand l'eau d'un puits renferme 1 milligramme (1) de phosphates en plus de la dose maxima trouvée pour les sources du même gisement, on peut être certain qu'une infiltration suspecte s'est produite quelque part.

Cette infiltration est suspecte parce que les phosphates, en contact intime avec le sol, sont retenus énergiquement par lui. Au contraire les nitrates ne le sont pas du tout.

S'il y a une infiltration suspecte les phosphates peuvent manquer, mais leur présence accuse un manque évident de filtration. En présence de phosphates et de matières organiques, une augmentation des chlorures permet d'affirmer que l'infiltration est importante et qu'il est urgent de la faire disparaître.

Oxygène. — L'eau renferme de l'oxygène emprunté à l'air qui peut être absorbé par les germes. Une eau pauvre en cet élément est à rejeter, car elle indique qu'elle est le siège d'une putréfaction : c'est une eau corrompue.

Chaux. Magnésie. Sulfates. Fer, etc. — Ces éléments ne sont intéressants qu'au point de vue de l'emploi de l'eau, soit dans l'industrie agricole, soit pour l'alimentation des chaudières. C'est un tout autre problème. Chacun sait qu'une eau de chaudière doit être très pauvre en sulfate, voire même exempte de ce corps. Moins elle sera riche en chaux, mieux cela vaudra. Quant à la

(1) Quand les sources ne renferment pas de phosphates, les eaux des puits ne doivent pas non plus en contenir une simple trace.

magnésie, il faut que l'eau en possède le moins possible. La chaux et la magnésie se trouvent le plus souvent à l'état de carbonates dissous à la faveur de l'acide carbonique du sol. Au voisinage d'un puits, il se produit une combustion de matières organiques, quelquefois alors il y a dégagement de gaz carbonique et augmentation de la solubilité des carbonates de chaux et de magnésie, d'où une proportion plus grande de ces corps dans l'eau.

Ces éléments ne permettent guère de rechercher une contamination dans les eaux.

Tels sont les éléments d'une analyse d'eau et les explications qu'on en peut tirer. Nous avons cru utile de les développer rapidement dans ce paragraphe, car il arrive très souvent qu'un industriel ou un agriculteur fait faire une analyse des eaux de son puits et qu'il est fort embarrassé, une fois l'analyse faite, pour en tirer une conclusion quelconque. Certains laboratoires indiquent bien comme conclusion : eau bonne, médiocre ou mauvaise. Mais l'intérêt des conclusions est non seulement de savoir ce que vaut cette eau, mais encore de connaître les points faibles qui viennent en altérer la qualité. La simple conclusion de l'analyse est alors peu intéressante. Nous ne donnerons pas ici la technique employée pour prendre des échantillons d'eau et en faire l'analyse. Ce sont des matières du ressort des livres spéciaux sur l'analyse quantitative. Les chimistes doivent faire les prises eux-mêmes. S'ils ne le peuvent ils ont toujours soin d'envoyer une série d'instructions pour les précautions à prendre en pareil cas.

En résumé, l'analyse chimique intéressante pour les eaux des puits ou des sources doit porter sur les éléments indiqués ci-dessous qui permettent les conclusions suivantes :

Résistivité électrique. — Ne doit pas descendre de plus de 500 ohms au-dessous de la plus petite résistivité des sources de la région.

Extrait sec à 18°. — Ne doit pas être supérieur à 500^{mg} par litre.

Chlore. — Ne doit pas être supérieur à la plus forte dose de cet élément contenu dans les sources issues du gisement géologique sur lequel on se trouve (dosage fait sur eau pompée et avant pompage).	S'il y a augmentation, on conclura à une arrivée de liquides suspects.
Matières organiques. — Analyse à faire sur eau avant pompage. Si elle dépasse 2^{mg} par litre, indique une arrivée relativement rapide de matières organiques de la surface. Trop de matière organique est nuisible.	S'il y a peu de chlore, ce sont des matières organiques d'origine végétale.
Ammoniaque. — Indique dans les eaux, avant et pendant le pompage, de mauvaises conditions de nitrification.	Eaux toujours suspectes, surtout s'il y a des matières organiques d'origine animale.
Azote nitrique. — Dans l'eau pendant le pompage, ne doit pas être trop abondant (de 2 à 5^{mg} par litre). Au delà de 5 jusqu'à 10^{mg}, indique une nappe locale peu étendue avec un très faible écoulement.	Au delà de 10^{mg}, l'eau peut être nuisible à certaines industries comme la distillerie et la brasserie.

Phosphates. — Sauf dans certains terrains contenant cet élément à l'état naturel, doivent être absents.

Le degré de filtration de l'eau se mesure, avons-nous dit, à la présence du *B. coli communis*. Ce germe doit être absent des eaux si la filtration est suffisante. Par conséquent, si on rencontre une eau riche en chlore mais exempte de ce germe, on en conclura que la filtration par le sol suffit à annihiler la contamination. Une teneur microbienne variable indique également un défaut de filtration de l'eau à travers le sol.

Voici à titre d'exemple la composition moyenne de l'eau des nappes de la Lorraine, par M. Imbeaux (d'après 250 analyses).

	Degrés hydrotimétriques. Total.	Degrés hydrotimétriques. Permanents.	Résidu fixe.	Chaux (CaO).	Magnésie (MgO).	A. sulfurique SO^3.	Chlore combiné Cl.	Alcalis en chlorures.	Silice.
			mmgr.	mmgr.	mmgr.	mmgr.	mmgr.	mmgr.	mmgr.
S. du grès vosgien	3°,1	0°,7	30	13	4	2	3	5	3
— bigarré	14°,3	5°,5	150	62	13	11	5	12	1
Nappe médioconchylienne	28°,5	7°,0	var. 315	137	var. 25	28	6	12	13
— supraconchylienne (calcaires dolomitiques)	38°,8	16°,4	410	155	var. 60	var. 10	6	48	11
— de la base du Keuper	34°,5	6°,5	470	186	12	56	14	var. 18	»
— du gypse (Keuper moyen)	62°,9	49°,0	750	251	68	var. 165	21	35	»
— dolomitique (base du Keuper supérieur)	40°,2	21°,9	490	160	var. 65	39	11	40	»
— du grès infraliasique (rhétien)	34°,9	11°,1	420	155	32	25	8	»	»
— du calcaire du lias	31°,0	9 0	400	142	20	21	8	54	»
— du calcaire ocreux	41°,6	5°,7	480	227	9	28	14	var. 23	»
— du grès médioliasique et des schistes à posidonies	37°,5	17°,0	470	190	12	76	14	27	»
— bajocienne (base de l'oolithe sur le lias)	25°,0	6°,5	280	127	7	9	7	27	»
1° Nappe de la base du Bathonien	25°,3	5°,8	274	137	6	12	5	33	»
2° — — —	28°,6	5°,0	340	140	10	15	10	8	»
Nappe médiobathonienne	23°,0	11°,0	300	130	9	30	10	10	»
— du calcaire calovien	30°,1	2°,6	370	173	4	10	9	15	»
— infracorallienne	28°,0	8°,0	320	135	17	16	6	36	»
— du sommet du Corallien et de la base de l'Astartien	26°,5	12°,0	320	96	24	20	3	39	»
— des alluvions des vallées	10°,5	5°,7	140	46	10	12	7	22	4

VI

DÉTERMINATION D'UN POINT CONTAMINANT UNE EAU

Lorsque la contamination est relativement voisine et importante, on a tout intérêt à la faire disparaître. Le plus souvent en effet, on n'a pas toujours le choix des endroits pour s'alimenter en eau. Il faut alors déterminer les points où se produisent ces contaminations extérieures au puits. Deux procédés sont employés : l'un qui consiste à utiliser les matières colorantes, l'autre qui, par un changement de technique, utilise l'analyse chimique.

Premier procédé. — Nous avons déjà parlé des expériences, avec les matières colorantes, dans l'étude d'un périmètre d'alimentation. L'emploi de ces mêmes substances dans les recherches des lieux de contamination se fait ici encore suivant les mêmes principes. Il faut également une certaine quantité d'eau, mais on doit éviter ici de trop grandes surcharges d'eau quand on est trop près du puits sur lequel on veut opérer.

En effet, si on faisait arriver trop d'eau, on imbiberait complètement les terres. Le puits servirait de drain d'assainissement à ces terrains humides dont les eaux filtreraient à travers la maçonnerie. Le résultat positif de l'expérience ne signifierait nullement qu'il y a, en temps ordinaire, une contamination par ce point, mais tiendrait seulement à la technique employée.

Quand on veut, par exemple, savoir si un fumier envoie ses infiltrations dans un puits voisin, on enlève du fumier et on met à jour une partie du sol sur lequel il repose. On répand une dose assez grande de fluorescéine ou de fuchsine et on chasse la matière colorante dans le sol en arrosant cette place pendant deux ou trois

heures (1). Dans les terrains perméables en petit l'arrosage doit être continué pendant un temps plus long (jusqu'à quarante-huit heures). Avant de verser le contenu d'un arrosoir il faut que celui du précédent soit absorbé par le sol. Enfin on doit éviter de provoquer une infiltration à travers la partie supérieure de la maçonnerie. A plus de 10 mètres du puits, dans les terrains perméables en petit on peut, pour chasser la matière colorante dans le sol, faire sur l'emplacement du fumier un petit fossé de 40 centimètres de profondeur et maintenir constamment ce trou plein d'eau (2).

La quantité à employer est de 100 grammes de fluorescéine ou de 1 000 grammes de fuchsine par 10 mètres de distance du fumier au puits.

Le reste de l'expérience se poursuit comme dans le cas d'une source ordinaire. Admettons que le puits ne soit pas directement sur le courant recevant la contamination. On a soin de pomper très souvent de façon à attirer l'eau du courant dans le puits. Quand le puits est parcouru par un courant de vitesse suffisante, le pompage n'est pas nécessaire. Il en sera de même quand, dans un puits non à courant, on a constaté à l'analyse, d'après la technique indiquée plus haut, que la contamination arrive directement dans le puits. Quand il y a plusieurs points suspects, on est bien obligé de faire plusieurs expériences avec les matières colorantes (3).

(1) La technique à employer diffère en réalité suivant les terrains. La longue pratique, en ces sortes de recherches, permet de varier, dans un sens favorable, les conditions d'expériences.

(2) Il est utile de maintenir les fosses d'aisances, même proches du puits, constamment pleines d'eau colorée pendant l'expérience.

(3) On emploie également les germes vivants comme la levure de bière, le *Micrococcus prodigiosus*, le *Mycoderma aceti*, le *Mucor* β, etc., pour démontrer la réalité d'une contamination. Ils servent aussi à mesurer le degré de filtration du sol.

On s'assure préalablement que l'eau du puits ou de la source ne renferme pas normalement le germe utilisé dans ces expériences. Ces essais durent trois à quatre jours à raison de 4 échantillons par jour.

La levure de bière, le *Micrococcus prodigiosus*, le *Mucor* β sont très



Deuxième procédé. — Comme nous l'avons déjà dit, l'analyse chimique d'une eau n'indique pas toujours

souvent absents dans la plupart des eaux. Au contraire le *Mycoderma aceti* n'y est pas rare.

La jetée de ces germes, à l'endroit convenable, se fait comme il a été dit pour la fluorescéine. On les mélange aussi intimement que possible avec de l'eau. On répand celle-ci sur le sol et on facilite l'infiltration de ce mélange en faisant une surcharge d'eau. Avant l'expérience, la levure est rajeunie par une addition de sucre. On emploie généralement 10 kilos de levure quand la contamination supposée se trouve à 1 kilomètre de la source examinée si celle-ci débite 1 mètre cube à la seconde. A mesure qu'on s'éloigne, on augmente proportionnellement la quantité de ces germes.

Il vaut toujours mieux employer une grande quantité de levure. Le prix seul limite son emploi. Les autres germes sont plus difficiles à se procurer en grande quantité. On en emploie le plus possible.

Dans le cours de l'expérience on prélève quatre fois par jour des échantillons d'eau. Ceux-ci sont mis dans la glace jusqu'au moment de leur ensemencement.

Ces recherches bactériologiques doivent être faites par des bactériologistes qui connaissent le milieu de culture le plus convenable pour la recherche de ces différents microbes.

Pour la levure le meilleur bouillon est le suivant :

Eau de levure..................	1000	centimètres cubes.
Acide tartrique..................	2	grammes.
Bitartrate de potasse............	3	—
Sucre.........................	300	—

On ensemence 100 centimètres cubes d'eau avec 100 centimètres cubes de ce milieu. On place le tout à l'étuve à 25°. Au bout de dix jours on examine la culture au microscope. On dose l'alcool formé et on recherche si les levures rencontrées donnent des spores. On a affaire à un *Saccharomyces cerevisiæ* quand tous ces caractères sont positifs.

La recherche du *Micrococcus prodigiosus* se fait dans du bouillon de viande. En culture aérobie on voit apparaître au bout de deux à quatre jours un liséré superficiel rosé. Celui-ci peut échapper à l'analyste. Il poursuit ses recherches et ensemence sur pomme de terre la culture développée sur bouillon. Au bout de huit jours une coloration rouge se manifeste en quelques points de la pomme de terre lorsque l'eau ensemencée contenait du *Bacillus prodigiosus*.

MM. Miquel et Mouchet préconisent le milieu suivant pour la recherche du *Bacterium aceti* :

Peptone.........................	20	grammes.
Sel marin......................	10	—
Alcool à 95°....................	120	centimètres cubes.
Acide acétique cristallisable......	8	—
Eau, quantité suffisante pour faire.	1000	—

On mélange 100 centimètres cubes de ce bouillon à 100 centimètres cubes de l'eau à analyser. Au bout de dix jours on dose l'acide acétique. Si ce

d'une façon suffisante et nette les contaminations locales. Toutefois elle permet dans certains cas par un changement de technique de se rendre compte de l'emplacement d'une contamination. Nous en avons déjà donné quelques exemples. Cette détermination est intéressante quand on veut éviter de faire de trop nombreuses expériences avec les matières colorantes.

Le principe de la méthode employée dans ce cas est le suivant :

Considérons un courant souterrain recevant en A, B, C, D, etc., des infiltrations. La vitesse moyenne du



Fig. 74. — Courant souterrain et en A,B,C,D des contaminations.

courant souterrain est V. Sa section est supposée uniforme pour simplifier et est désignée par S (fig. 74).

Les divers points suspects d'infiltrations (A, B, C, D, etc.) envoient, par seconde, des volumes d'eau contaminée V_a, V_b, V_c, V_d, — — dans le courant souterrain.

En une seconde il passe en A, par exemple, un volume d'eau du courant souterrain représenté par VS.

La contamination de A peut renfermer par litre n milligrammes de chlore, A envoie par seconde $n \times V_a$ milligrammes de chlore qui se dilueront dans un volume VS du courant. Ce dernier, entre A et B renfermera $\frac{V_a}{VS} \times n$ de

germe se développe dans les ballons, le milieu de culture augmente d'acidité. L'eau renferme souvent naturellement le *Bacterium aceti*. Les essais préliminaires, faits avant l'expérience, indiquent la proportion de ces germes renfermée normalement dans l'eau examinée. Pour en déduire que le sol filtre mal il faut trouver, dans le cours de l'expérience, une augmentation très sensible du nombre de ces bactéries.

Dans les ballons de culture les germes recherchés ne sont pas seuls. D'autres espèces se développent et entrent en concurrence vitale avec ceux-là.

Très souvent, dans le cas d'une contamination, on ne rencontre le germe d'expérience que dans 2 p. 100 environ des ballons ensemencés. Plus l'arrivée des germes sera facile, plus il y aura de ballons renfermant l'espèce recherchée.

chlore. De même pour chacun des autres points. Si à l'amont de A on avait pu déterminer la richesse du courant en chlore, et si à l'aval de D on pouvait refaire une pareille détermination, on trouvera en ce dernier point une augmentation de chlore représentant la somme :

$$\frac{V_a}{VS} n + \frac{V_b n'}{VS + V_a} + \frac{V_a n''}{VS + V_a + V_b} + \frac{V_c n'''}{VS + V_a + V_b + V_c}$$

Si ces infiltrations sont insuffisantes pour produire une augmentation de plus de 1 milligramme de chlore, les contaminations passent inaperçues. Si les contaminations augmentent la richesse en chlore de plus de 1 milligramme, on soupçonne une contamination, mais on ne sait en quel point elle se trouve et, s'il y en a plusieurs, quelle est la plus importante. D'autre part, très souvent il est impossible d'analyser le courant à l'amont de A.

Diminuons momentanément la vitesse V, les volumes d'eaux infiltrées, contaminées restant constants. A ce moment, comme notre formule l'indique, on constatera une augmentation de la teneur des eaux du courant en chlore. Celle-ci n'aura pas lieu brusquement (1). Au moment où on diminue le courant on peut faire des prises d'eau en aval de D pour y doser le chlore. La première portion du courant qui aura ressenti les effets de la diminution de la vitesse sera celle venant de D. On constatera donc une première augmentation de chlore provenant de l'influence de l'infiltration en D, puis une autre venant de C puis de B, enfin de A.

En résumé, si on porte en ordonnées les taux de chlore trouvés dans les prises successives et en abscisses

(1) Quand on diminue ou arrête la vitesse d'un courant, l'eau de la nappe s'élève dans le sol. Les phénomènes qui se passent sont donc un peu plus compliqués que dans notre schéma. Ce qu'on constate en réalité c'est un petit étirement des zones contaminées par les points A, B, C, D, etc. Les conclusions restent exactes.

l'heure de ces prises, on aura une courbe de la forme représentée sur la figure (fig. 75).

Connaissant la vitesse de l'eau dans le courant souterrain, la distance des points A, B, C, D, etc., est donnée par la formule $e = vt$, v étant la nouvelle vitesse du courant, t le temps qui est ici l'heure d'apparition des différentes contaminations.

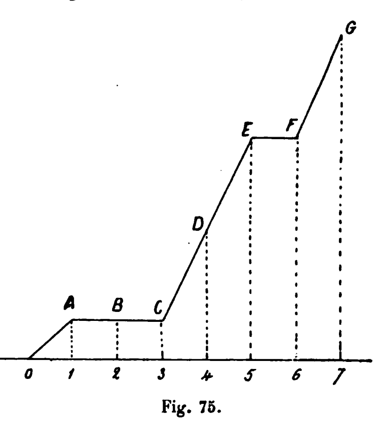


Fig. 75.

D'autre part, la contamination sera d'autant plus importante que l'augmentation de la richesse des eaux en chlore sera plus grande. L'examen des résultats indiquera donc le lieu de plus forte contamination.

On peut, dans certains cas, arrêter le courant souterrain. Les infiltrations suspectes n'en continueront pas moins à contaminer le courant, mais n'enrichiront en sels que des portions très restreintes de celui-ci, situées au voisinage des points A, B, C, D, etc.

L'enrichissement en sels, et en particulier en chlore, de ces diverses parties, sera d'autant plus grand que le temps d'arrêt du courant sera plus long et l'infiltration plus considérable.

Au bout d'un certain temps, on pourra rétablir le courant. Toutes les dix minutes on fera des prises d'eau dans celui-ci pour y doser les sels et en particulier le chlore. Les résultats de ces analyses sont ensuite portés en ordonnées, et les temps en abscisses. On réunit ces diffé-

rents points par une ligne et on obtient une courbe un peu différente de la précédente. Chaque maximum indique un point de contamination (fig. 76).

Aux sources de l'Avre nous avons pu, par cette mé-

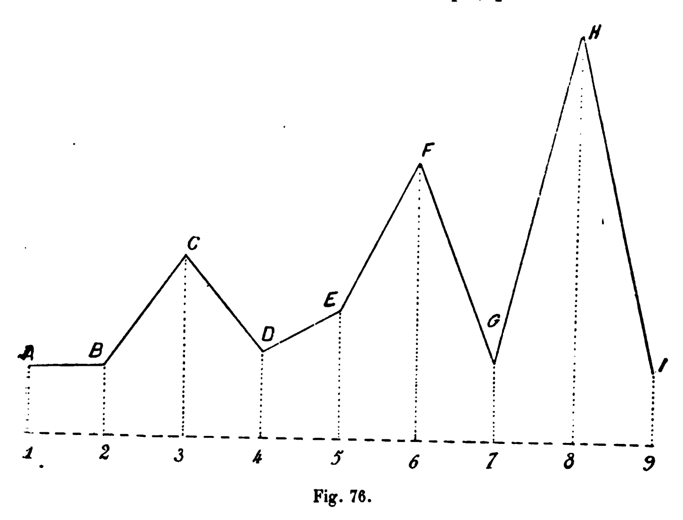


Fig. 76.

thode (1), déceler les contaminations d'une source captée par la ville de Verneuil.

Cette émergence, au moment des basses eaux, tarit parce que son niveau piézométrique est inférieur à celui du sol. Pour alimenter Verneuil, on pompe dans cette source qui, à cette époque, n'est en réalité qu'un puits alimenté par une diaclase importante. Pendant le tarissement de l'émergence, l'eau de la diaclase est stagnante, sur plus d'un kilomètre de longueur tant que Verneuil n'y pompe pas d'eau. C'est un cas très rare. Généralement les diaclases ont un fond perméable, et leurs eaux vont

(1) Comptes rendus des travaux de la Commission de perfectionnement de l'Observatoire de Montsouris, 1902.

ressortir à des sources situées plus en aval. Ici le fond de la diaclase semble pratiquement imperméable.

Quand on pompe dans cette source tarie, on crée un courant. Quand on ne pompe plus, on annule la vitesse de celui-ci. En octobre 1902, nous avons fait reposer les pompes pendant vingt-quatre heures puis, pendant le pompage qui a suivi, nous avons prélevé des échantillons d'eau, dans lesquels on a dosé le chlore. Les résultats peuvent être représentés au moyen de la courbe (fig. 76).

Ce moyen seul nous a permis de déceler les contaminations reçues par cette source, provenant de nombreux puits perdus et de fosses d'aisances. L'analyse chimique faite comme on a coutume, n'accusait aucune contamination.

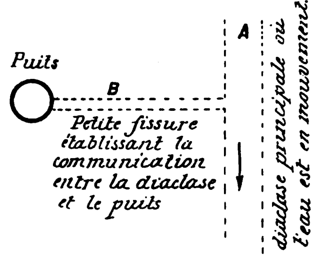


Fig. 77.

C'est cette méthode que nous préconisons pour déceler les contaminations se produisant entre les puits et le courant souterrain A, c'est-à-dire (fig. 77), le long de la petite fissure B. Quand on ne pompe pas dans le puits, l'eau de celle-ci est stagnante et les contaminations s'y concentrent. Au contraire, lorsqu'on pompe, on crée un courant souterrain dans la fissure B; c'est-à-dire qu'on se place bien dans les conditions indiquées précédemment.

On arrive ainsi à déceler par l'analyse chimique les infiltrations, même faibles, de purins, fosses d'aisance, etc.

Au contraire, par cette méthode, on ne change pas le régime dans le courant principal A. Les contaminations que celui-ci reçoit ne pourront pas être décelées par ce moyen.

Par ces expériences on s'est assuré que le puits reçoit

des contaminations. Pour connaître la distance approximative des points où elles se produisent, on doit connaître la vitesse du courant souterrain. On détermine celle-ci avec la fluorescéine.

Pendant l'arrêt du pompage, à 20 ou 30 mètres du puits, on produit une infiltration dans le sol de cette matière colorante. Celle-ci va colorer les eaux de la nappe aux environs immédiats de ce point. Après quelques heures de repos on pompe. On note l'heure du commencement du pompage et également celle d'apparition de la fluorescéine, soit T le temps qui s'est écoulé entre ces deux instants. On connaît la distance L du lieu d'introduction de la fluorescéine au puits. La vitesse moyenne V du courant est le quotient $\frac{L}{T}$. Connaissant V et le temps d'apparition de chaque contamination, soit t', t'', t''', etc., les produits Vt', Vt''. Vt''', etc., représenteront les distances auxquelles les diverses contaminations devront être recherchées. Un examen sur le terrain permettra de les déterminer définitivement et d'y apporter les remèdes les plus pratiques pour y pallier.

VII

DES EAUX QUI SONT CONSIDÉRÉES COMME LES PLUS PURES

Les causes de contamination sont présentes dans tous les terrains. Elles sont d'autant plus grandes qu'on est dans les environs d'une ville très peuplée ou d'une agglomération.

Nous allons voir bientôt comment les eaux se purifient dans le sol. Mais on comprend *à priori*, que plus les eaux contaminées mettront de temps pour aller ressortir à une source ou alimenter un puits, plus les causes

favorables à l'épuration manifesteront leurs effets.

Dans les vallées, la nappe d'eau superficielle est généralement située à une faible profondeur. C'est une des raisons pour lesquelles la densité de la population augmente en ces points. Or, pour éliminer leurs eaux usées et leurs déjections, les habitants font le plus souvent de simples trous qui communiquent avec les eaux de la nappe souterraine. Celle-ci sera alors contaminée en un grand nombre de points si le sol ne filtre pas.

On peut donc prévoir que les eaux suspectes se rencontreront le plus fréquemment dans les vallées. Pour obvier à cet inconvénient, on recommande de ne pas prendre les eaux circulant à la partie supérieure des alluvions.

Dans les grandes vallées, il existe généralement dans ces terrains deux nappes d'eau. La plus superficielle est celle qui reçoit les contaminations. Elle est séparée de la seconde par une couche plus ou moins épaisse d'argile. Celle-ci n'est peut-être pas complètement imperméable, ainsi que M. Mac Callie l'a montré au moyen du chlorure de sodium, mais protège souvent suffisamment les eaux inférieures contre les contaminations superficielles.

Il faut avouer qu'il est souvent assez délicat de distinguer *à priori* une première nappe d'une deuxième nappe.

Pour les eaux potables, on cherchera toutes les fois qu'on le pourra, cette deuxième nappe.

Au point de vue analytique, on constate que la première nappe est toujours riche en matières organiques et en bacilles *coli communis*. La deuxième nappe encontient beaucoup moins.

L'effet d'une telle distinction est très sensible au point de vue sanitaire. Nous citerons la ville de Nemours, qui a vu disparaître la fièvre typhoïde, quand on a eu creusé tous les puits jusque dans la deuxième nappe.

Sur les plateaux ou dans les vallées secondaires où la nappe est assez profonde, les eaux sont en général meilleures. On conserve généralement les fumiers et les purins dans des conditions défectueuses et la plupart des puits des fermes sont contaminés, même sur les plateaux où l'épaisseur du sol est considérable. On s'en aperçoit à l'analyse chimique parce que la plupart sont creusés en dehors du courant souterrain.

Nous avons déjà dit que dans un courant souterrain de débit suffisant, les infiltrations de purins ou de fosses d'aisances ne se manifestaient pas à l'analyse chimique (à la Guinaud, dans le département de l'Aube, par exemple).

Au point de vue hygiénique, l'eau recevant de telles infiltrations est toujours dangereuse. Elle l'est beaucoup moins qu'une eau de puits non creusé directement sur un courant souterrain recevant des infiltrations de purin. Les microbes nocifs y sont en abondance et ont plus de chance de prendre possession du corps humain où ils se développeront et créeront la maladie. Les eaux des puits à courant doivent être préférées à tous les points de vue aux autres; toutefois, pour alimenter une agglomération, il faut éviter les eaux qui sortent immédiatement de sous une ville.

Les meilleures eaux au point de vue de l'alimentation sont celles trouvées à la base d'un terrain perméable en petit de plusieurs décamètres d'épaisseur.

Dans les terrains perméables en grand, les infiltrations seront nulles quand le sol en amont du point où on doit prendre les eaux, sera boisé, ou surmonté d'une montagne et inhabitée. Aucun purin, aucun fumier ne sera susceptible de venir contaminer ces eaux. Elles sont donc d'excellente qualité.

La forêt permet, nous avons vu, d'augmenter la quantité d'eau souterraine disponible. Elle en améliore également la qualité. Ce sera un grand progrès dans certains pays très peuplés, quand plusieurs aggloméra-

tions se syndiqueront pour reconstituer la forêt sur le faîte des périmètres afin d'aller, à la sortie de celle-ci, capter les eaux qui sont les meilleures pour l'alimentation.

Il faut éviter également les eaux acides, si on doit les conduire dans des canalisations en plomb. Sous l'influence de l'acidité, ce métal se dissout dans l'eau et détermine dans l'intérieur du corps le saturnisme, maladie provoquant des accidents mortels. Les eaux acides sortent des tourbières ou proviennent de terrains chargés d'émanations acides provenant de la décomposition de roches ou de gaz. Ainsi les pyrites s'oxydent et rendent les eaux acides. Les eaux au voisinage des volcans ou de points donnant lieu à des émanations sulfureuses sont également acides.

Mais en contact avec le carbonate de chaux ou les alcalis, ces eaux acides se chargent de sels de chaux et deviennent neutres, voire même légèrement alcalines.

Dans les tuyaux de plomb les eaux chargées d'alcalis ou de carbonate de chaux n'ont pas le même inconvénient. Quand les tuyaux sont neufs, il y a bien une petite dissolution, mais bientôt ces eaux chargées d'oxygène et de CO^2 aident à la formation rapide d'un hydrocarbonate de plomb, insoluble dans les eaux alcalines. Celle-ci forme une couche protectrice sur la surface interne du tuyau. Le plomb métallique est alors complètement séparé de l'eau et ne s'y dissout pas. Là où il y a une soudure de plomb avec un autre métal (tel, par exemple, l'endroit où se trouve ajusté un robinet de cuivre) il se forme un couple électrique qui favorise la dissolution du plomb.

L'effet est très localisé et l'inconvénient est minime quand on a soin d'évacuer les premières eaux qui s'écoulent d'un robinet qu'on vient d'ouvrir.

VIII

PROCÉDÉS POUR RENDRE LA POTABILITÉ A L'EAU D'UN PUITS

Après avoir examiné les moyens de rechercher les causes de contamination et d'avoir des eaux potables, nous indiquerons les moyens de redonner la potabilité à une eau quand on a éliminé la cause de suspicion.

Certaines eaux sont très chargées en sels dans quelques gisements géologiques. On ne peut leur redonner une composition minérale moindre qu'à la condition de les traiter chimiquement.

Rendre une eau potable quand on a supprimé les causes de contaminations n'est pas un problème très commode par lui-même. Souvent la contamination, quoique se produisant depuis longtemps, ne commence à se manifester qu'après plusieurs années; de telle sorte qu'une grosse partie du sol est infectée. Supprimer à un moment donné les infiltrations de la surface (fosses d'aisances ou purin) ne rendrait pas l'eau potable immédiatement.

Il est enfin une autre contamination mais passagère ; elle résulte de l'introduction brusque, dans l'eau du puits non couvert, d'un élément de contamination, comme un animal tombé accidentellement.

Suivant ces divers cas il faudra employer différents moyens.

Premier cas. — L'infiltration de la fosse d'aisances ou du jus de purin se faisait par la maçonnerie même du puits :

La première opération consiste à pomper l'eau du puits et à curer son fond de façon à faire arriver dans le puits de l'eau non contaminée. On y verse ensuite de

l'eau de brome, oxydant énergique des matières organiques. Cette substance pénètre en partie dans le sol et brûle les substances suspectes provenant de l'infiltration. On recommande de verser de *20 à 50 grammes* de brome par mètre cube d'eau contenu dans le puits et à laisser agir cette substance pendant au moins huit jours. Il sera même utile, si la contamination est très sérieuse, de laisser cette eau bromée en contact pendant un temps supérieur, pendant environ quinze jours.

Après ce temps, l'eau est pompée plusieurs jours de suite jusqu'au moment où l'eau de brome a disparu.

Deuxième cas. — L'infiltration de la fosse d'aisances ou du jus de purin se faisait à plusieurs mètres en amont du puits.

C'est un cas très fréquent. Pour améliorer la quantité des eaux, on emploie également ici l'eau de brome. On a soin de l'employer à dose plus grande, car il va falloir chasser cette substance dans le sol jusqu'au point de contamination. On introduit dans le puits 20 grammes de brome par mètre cube d'eau qu'on chasse ensuite dans le sol au moyen d'une charge d'eau contenant 20 milligrammes de brome par litre. Cette opération dure huit jours. Après ce temps, on laisse les eaux se reposer pendant huit autres jours. Puis on pompe l'eau du puits jusqu'au moment où elle ne contient plus trace de brome.

Troisième cas. — Chute d'un animal quelconque. — Pour éviter le curage du puits on recommande, après avoir enlevé l'animal mort, d'introduire dans le puits soit un mélange d'acide phénique et d'acide sulfurique, soit un mélange de permanganate et d'acide sulfurique.

Les doses à employer sont :

Permanganate de potasse........	200 grammes.
A. sulfurique....................	100 —

ou bien encore

A. phénique	200 grammes.
A. sulfurique	100 —

Après un repos de quatre à cinq jours, on pompe jusqu'au moment où les eaux ne sont plus acides.

Ces différents moyens réussissent tant que la contamination n'est pas excessive. On doit toujours les tenter quand on veut essayer de rendre potable un puits donnant des eaux malsaines.

Mais quand ces moyens ont échoué, il faut s'astreindre à creuser un autre puits dans un endroit susceptible d'être peu contaminé en employant les méthodes indiquées dans un précédent chapitre.

IX

DE LA QUALITÉ DES EAUX DE SURFACE

En dehors des eaux souterraines dont nous nous sommes principalement occupés jusqu'ici, on peut s'adresser aux eaux qui circulent à la surfaee du sol, provenant soit de sources plus ou moins lointaines, soit de ruissellement à la suite des pluies.

Ces eaux de surface ont le grave défaut d'être tièdes en été, froides en hiver. Elles ne peuvent donc être utilisées par certaines industries agricoles qui, comme la laiterie et la brasserie, réclament des eaux à température constante. Les organismes digèrent mieux les eaux fraîches que les eaux tièdes. Celles-là ont un goût plus agréable que celles-ci.

Là où on ne trouve pas d'eaux, peu chargées en sels minéraux, comme, par exemple, dans une région très riche en sulfate de chaux, ces eaux sont très employées. A Versailles, par exemple, on a coutume de diluer les eaux de puits, très riches en sels, au moyen d'eaux de ruisselle-

ment venant des étangs de Trappes et de la forêt de Rambouillet.

D'autre part, pour alimenter les machines à vapeur, les eaux de surface offrent souvent de très grands avantages. On les préfère aux eaux souterraines quand ces dernières sont assez chargées en sels de chaux. Mais à égalité de degré de minéralisation, on préfère encore les eaux souterraines qui, plus propres, n'introduisent pas dans les chaudières des particules de sables. Celles-ci contribuent à l'usure des robinets.

Les compagnies de chemin de fer font un grand usage de ces eaux superficielles pour alimenter leurs locomotives.

Le degré de minéralisation d'une eau de surface diminue quelquefois au fur et à mesure qu'on passe de l'amont vers l'aval. Ainsi la Seine qui a un degré hydrométrique de 21° à Montereau, n'a plus qu'un degré hydrométrique de 17° à Paris.

Ceci tient à la végétation qui se développe sur le fond et la surface des fleuves, laquelle absorbe du gaz CO^2 des bicarbonates contenus dans l'eau et favorise le dépôt de CO^3Ca.

La qualité d'une eau superficielle est souvent très compromise quand, à l'amont de l'endroit où on doit faire la prise, se trouve des usines ou des agglomérations qui envoient leurs résidus dans l'eau du fleuve ou de la rivière.

Parmi les industries qui contaminent ainsi les eaux superficielles, soit par leurs produits organiques (animaux ou végétaux), soit par leurs substances toxiques ou nuisibles à l'organisme, il faut citer : les fabriques de poudrettes et d'engrais, les féculeries, teintureries, tanneries, sucreries, distilleries, papeteries, buanderies, abattoirs, équarissages, industries textiles, fonderies, buanderies, lavoirs, fabriques de soude, lavage de laines, chapelleries, macérations des bois, rouissages,

fabriques de draps, lavage des peaux tannées, fabriques de couleur d'aniline (1).

Il est donc nécessaire, avant de s'engager à prendre de l'eau dans un fleuve ou une rivière, de rechercher les causes de contaminations tout le long du cours d'eau. Quand le volume de celui-ci est important, les eaux usées d'une usine se diluent suffisamment pour ne pas être très nuisibles; mais il est certaines substances, comme le goudron, qui donnent à l'eau une odeur spéciale et désagréable. Il faut empêcher leur arrivée ou renoncer à prendre ces eaux.

Voici la technique que nous recommandons dans ce cas : on remonte le cours d'eau et on fait des prises d'eau à l'aval et à l'amont de chaque agglomération et également dans la partie où les usines évacuent leurs eaux résiduaires. L'analyse de cette dernière prise indique la nature des eaux évacuées, celle des deux premières le degré de dilution de ces eaux dans le cours d'eau. Les contaminations par les égouts sont toujours très suspectes. Ces eaux superficielles ainsi contaminées ne sont potables qu'après un traitement approprié. Certaines eaux résiduaires, comme celles contenant de la potasse ou de la soude, ne sont plus nuisibles lorsqu'elles sont suffisamment diluées. On ne doit jamais tolérer la présence des goudrons dans les eaux potables.

Pour ce genre d'études le choix de la saison est important. A l'étiage, c'est-à-dire au moment des basses eaux, la contamination des eaux sera la plus grande, c'est donc à cette époque qu'il importe de faire des prélèvements. Pour l'interprétation des analyses, on se rapportera à tout ce qui à été dit relativement aux eaux souterraines. On a l'avantage, dans un cours d'eau superficiel, de pouvoir faire une prise à l'amont et une autre à l'aval des points de contamination, ce qui était

(1) I. Ogier et Ed. Bonjean : *Le Sol et l'Eau,* p. 352 (Traité d'hygiène de Brouardel et Masny, fasc. II).

généralement impossible pour les cours d'eau souterrains. Comme pour ces derniers, si c'est nécessaire, on diminuera quelquefois momentanément la vitesse de la rivière qu'on rétablira quelques heures après.

X

ÉPURATION NATURELLE DES EAUX

Les fosses d'aisances, les fosses à purin laissent très souvent écouler dans le sol une partie de leurs liquides.

Ces eaux contaminées qui s'infiltrent auraient bientôt infecté toutes les eaux souterraines si, pendant leur parcours souterrain, elles ne perdaient leur nocivité.

Les causes qui influent sur cette épuration sont d'ordre physique, chimique et biologique. Pour chacun de ces processus la question temps est importante. C'est pourquoi, toutes choses égales d'ailleurs, les eaux souterraines sont d'autant plus pures qu'elles seront restées plus longtemps dans le sol.

Les éléments qui varient dans le cours de l'épuration d'une eau sont : les microbes, les matières organiques, l'ammoniaque. Certaines substances comme les phosphates sont retenues par le sol arable, d'autres au contraire, comme les chlorures et surtout les nitrates, sont entraînées facilement jusqu'à la nappe. La nature a donc limité à un petit groupe d'éléments son action épurante.

On recherche de préference l'épuration microbienne, laquelle dépend de nombreux facteurs.

Action physique.

L'épuration physique d'une eau comprend : 1° la filtration ; 2° l'action solaire ; 3° l'influence de la radio-activité ; 4° la décantation ; 5° l'agitation.

Filtration. — Le phénomène de filtration résulte d'une action physico-moléculaire générale. Lorsqu'un liquide quelconque, tenant en suspension et en dissolution diverses substances, arrive en contact avec la surface d'un solide, il s'exerce entre le solide et les substances dissoutes ou en suspension dans le liquide, une force attractive telle, qu'après le contact, le liquide se trouve avoir une composition très différente. Cette force est appelée très souvent : *force adhésive*. C'est ainsi que nous la désignerons dans ce paragraphe. Elle ne s'exerce pas au delà d'une très faible distance de la surface du solide. Tout l'espace au milieu duquel cette force adhésive s'exerce est désigné sous le nom de *sphère d'activité*.

M. Spring a montré que les gaz étaient absorbés par les sables. Il se fait autour de chaque grain une atmosphère particulière, malgré la présence de liquide. C'est pourquoi, dans une eau chargée de gaz, le tassement du sable ne se fait pas de la même façon qu'avec de l'eau bouillie. Ce phénomène ne se produit guère que pour les solutions très riches en gaz et voisines de leur point de saturation. Pour les autres, au contraire, l'affinité du gaz pour le liquide peut dépasser de beaucoup celle du gaz pour le sable.

Certaines substances chimiques dissoutes dans l'eau, comme l'acide propionique, filtrant à travers le sable, sont retenues énergiquement par celui-ci.

L'eau en contact avec le sable augmente de densité. Ceci a été démontré en 1894 par M. V. Garcin de la Cruz pour les eaux troubles. Ce qui se passe pour les substances

dissoutes se manifeste encore pour celles en suspension dans l'eau. Quand elles passent dans la *sphère d'activité* d'un grain de sable, elles sont attirées et retenues par celui-ci.

Plus le corps passe près de la surface solide, plus la *force adhésive* est grande.

Dans les sables, les grains sont rapprochés les uns des autres et les eaux qui s'infiltrent ont les plus grandes chances de passer dans l'intérieur de la sphère d'activité. Les microbes sont retenus en très grande quantité à la surface des sables, non pas parce qu'ils sont trop gros pour passer au milieu des espaces lacunaires, mais parce que la force adhésive les applique énergiquement sur cette surface. C'est ce qui constitue le phénomène de filtration.

Lorsqu'on sature un sable d'eau, Spring a démontré qu'il arrivait un moment où les grains s'écartent. Il se produit une augmentation des espaces lacunaires. Les particules en suspension passent à travers ces pores élargies, peuvent échapper, en partie au moins, à l'action de la sphère d'activité qui entoure chaque grain de sable. La filtration est alors très compromise. Cette propriété des sables non saturés d'eau est utilisée dans la purification des eaux par le filtre Miquel.

Dans les terrains fissurés, où l'espace lacunaire est bien plus grand que dans les sables, la filtration est réduite encore. Quand la fissure est trop grande il n'y a plus de filtration, sauf dans les endroits où des sables ou limons sont venus boucher cette cavité. M. Imbeaux a donné pour les fissures du Bajocien des environs de Nancy un exemple de ce dispositif.

Ceci ne veut pas dire qu'il n'y eût aucune filtration dans les calcaires fissurés. M. le Dr Raymond (1), étudiant les eaux infiltrées dans le calcaire de la région des Causses, en Ardèche, a montré :

(1) Dr Raymond, *La Nature*, 15 février 1896.

1° Que l'eau provenant des stalactites, de la voûte suintante, des gours dans lesquels l'eau n'a pas été remuée depuis longtemps reste stérile ;

2° Que les eaux provenant des fissures et arrivant en filets sont claires très généralement, quoique entrées boueuses dans le sol, mais chargées de microbes malgré une épaisseur de 250 mètres de calcaires.

Les microbes arrêtés ne sont pas morts. Ils peuvent se développer quand on leur donne de la matière organique pour former un bouillon de culture. En se développant les microbes rampent à la surface des grains de sable et peuvent atteindre ainsi la nappe souterraine. Or, dans les sables, les infiltrations de liquides organiques trop concentrés se transforment difficilement en nitrates. Les microbes se multiplient dans le sol et viennent ainst contaminer la nappe souterraine. Le sol n'est plus filtran au sens propre du mot. On pourrait craindre que les microbes en s'amoncelant viennent boucher les pores des sables. L'expérience montre qu'il n'en est pas ainsi. Les germes nocifs disparaissent complètement au bout d'un certain temps, laissant ainsi la place aux nouveaux germes que l'eau apporte.

Action solaire. — Le soleil est un très grand épurateur des eaux. De nombreuses expériences ont été faites sur ce sujet. On trouvera dans le livre de M. Kayser (1) le résumé des travaux relatifs à cette question. Nous nous contenterons de rappeler que le soleil semble agir par ses rayons chimiques situés principalement dans la partie ultra-violette du spectre. Le soleil n'agit pas dans le sol, son action se limite exclusivement aux eaux superficielles, aux eaux de rivières et de fleuves. L'action du soleil est très rapide, mais elle ne s'exerce guère que dans les eaux claires. Les eaux troubles opposent à son action un obstacle considérable.

(1) Ed. Kayser. *Microbiologie agricole*. ENCYCLOPÉDIE AGRICOLE.

On admet jusqu'ici, que l'action solaire est surtout chimique. Il se produit une oxydation intense des microbes et des matières organiques.

Radio-activité. — L'influence de la radio-activité se fait également sentir sur les microbes. La radio-activité est cette émanation qui quitte les sels de radium pour se répandre dans l'air. Elle jouit d'une propriété remarquable, celle de dissocier les gaz et de les rendre conducteurs de l'électricité.

On sait depuis quelque temps, que cette émanation jouit de la propriété de détruire les microbes. Les travaux de Danytz par exemple démontrent nettement cette action microbicide (1).

Or les eaux souterraines possèdent, pour la plupart, de l'émanation. Avec M. Bouquet, nous avons réussi à en déceler dans les sources captées par la Ville de Paris. Voici les résultats que nous avons obtenus :

Intensité en ampère du courant de décharge de l'électroscope par l'émanation dégagée par litre d'eau, unités C.G.S.

Source Cochepies	1.33×10^{-13}	Vanne
— Flacy	1.91×10^{-13}	
— Pâture	1.94×10^{-13}	
— Miroir	1.34×10^{-13}	
Source de la Dhuys	9.87×10^{-13}	Dhuys
Source de Bourron	0.56×10^{-13}	Loing et Lunain
— Chaintréauville	0.58×10^{-13}	
— Saint-Thomas	0.23×10^{-13}	
— Villemer	0.35×10^{-13}	
Source du Nouvet	1.40×10^{-13}	Avre
— Érigny	1.70×10^{-13}	
— Rivière	2.03×10^{-13}	
— Breuil	2.55×10^{-13}	

MM. Curie et Laborde avaient montré précédemment en 1904 qu'un certain nombre d'eaux minérales en contiennent également.

(1) L'émanation du radium a pour effet de diminuer la virulence des bactéries chromogènes, en particulier du bacille pyocyanique (Bouchard et Balthazard, *C. R.*, 2 avril 1906).

Aux sources de Plombières, les eaux viennent des terrains très profonds pouvant contenir du radium en quantité appréciable. Elles sont très radioactives.

Dans les terrains sédimentaires, non entrecoupés de failles, les eaux sont beaucoup moins radioactives. L'émanation provient très probablement de traces de radium ou de substances identiques contenues dans l'intérieur même de ces terrains.

Cette faible radioactivité est-elle suffisante pour tuer les microbes ou tout au moins pour atténuer leur virulence ?

Les expériences que nous avons entreprises à ce sujet ne sont malheureusement pas encore terminées et il est assez difficile de se prononcer actuellement sur cette action.

Les eaux de surface sont très peu ou pas radioactives. Si peut-être l'influence de la radioactivité se fait sentir sur les eaux de sources, elle est nulle pour les eaux de fleuves ou de rivières.

La radioactivité semble également très faible dans les terrains sédimentaires riches en sables, ou recouverts de sables. C'est pourquoi aux sources du Loing, on n'a trouvé qu'une simple trace de radioactivité. En résumé, il semble résulter jusqu'ici des faits que la radioactivité existe principalement là où la filtration n'existe pas. Toutefois elle est la plus forte dans les terrains très argileux. L'expérience montre que dans ces derniers les eaux sont très pauvres en bacilles du côlon. On n'est pas encore fixé sur l'action physiologique des traces d'émanation.

Décantation. — La décantation est également un moyen physique de purification. Elle se produit toutes les fois que des particules de substances en suspension dans l'eau peuvent s'unir entre elles, se précipiter et se déposer. La décantation permet aux eaux, surtout quand elles sont calcaires, de se débarrasser d'une grande partie des matières en suspension.

Ainsi dans l'eau distillée, l'argile se maintient très longtemps en suspension, au contraire dans l'eau calcaire elle se dépose très vite. Chaque particule d'argile possède une sphère d'activité. Des microbes se fixent sur ces particules et sont entraînés avec elles. Ce phénomène de décantation n'est donc qu'une modification plus grossière du phénomène de filtration. Par le repos et après un certain temps quelquefois considérable, les microbes arrivent eux-mêmes à se déposer au fond des cavités que les terrains fissurés possèdent. Il ne faut pas trop compter sur l'intensité exagérée de ce phénomène pour purifier des eaux impures. Il n'est guère sensible que dans les eaux troubles, très chargées en germes, souvent nocifs. L'entraînement de ceux-ci ne se fait qu'incomplètement. L'épuration, par ce moyen, est donc insuffisante.

Agitation. — L'agitation a également une influence nocive sur certains microbes.

D'après Howath et Wernich, elle gêne la multiplication et favorise la destruction des bactéries.

Cette action mécanique s'explique très mal. Comme les eaux souterraines sont relativement peu agitées, sauf là où il y a des chutes, l'influence de l'agitation se fait très peu sentir dans le sol. Il en est à peu près de même pour les eaux superficielles ordinaires. Dans les torrents son action est certaine, mais elle est faible et insignifiante comparée aux précédentes.

Action chimique.

Les actions chimiques d'épuration se réduisent à peu près uniquement à l'action de l'oxygène et de l'ozone. C'est une oxydation plus ou moins énergique qui brûle non seulement les microbes mais encore les matières organiques. En réalité, on connaît encore très mal cette partie de l'épuration. Les réactions multiples qui se passent

incessamment dans le sol peuvent dégager quelques substances nuisibles pour certains microbes. On sait, par exemple, que toutes les bases un peu fortes comme la potasse, la soude, la chaux, la magnésie, sont des antiseptiques surtout énergiques pour certains microbes pathogènes tels que le bacille du côlon et le bacille typhique. Mais aussitôt que ces bases se trouvent combinées avec l'acide carbonique elles n'agissent plus ou à peu près. L'action antiseptique est encore faible pour le carbonate de soude ou de potasse, elle est nulle pour le carbonate de chaux ou de magnésie. Dans la nature, dans des conditions toutes particulières, un de ces alcalis peut prendre momentanément naissance : sous l'influence du gaz carbonique toujours présent, il se transforme rapidement en carbonate. Cette action antiseptique n'est donc que passagère et tout à fait locale. On ne peut guère compter sur elle.

Le Dr Félix a montré que les silicates alcalins sont nocifs pour le bacille coli (1).

Quelques sels de métaux tels que le zinc, le plomb, l'étain, toutes les fois qu'il existe dans leur molécule un groupement OH, ont aussi une action antiseptique. Le carbonate de zinc, le sulfure de zinc qu'on rencontre dans la nature peuvent détruire, par leur contact, le bacille d'Eberth ou le bacille coli. Ces substances n'agissent qu'autant qu'elles sont en contact intime avec les microbes. Dans la nature ces corps n'existent guère que dans certains terrains et principalement dans les failles. Leur action est donc très limitée et peu fréquente. Elle s'exerce encore dans certaines occasions, comme par exemple sur les eaux de citernes provenant de toits en zinc.

Le zinc est généralement très peu employé pour récolter les eaux de pluies et les amener dans les citernes. Il leur

(1) Dr Félix, *Revue moderne de médecine et de chirurgie,* 1904, p. 874.

donne un goût un peu métallique et une limpidité douteuse. Ces eaux dissolvent, en effet, une assez grande quantité de zinc sous forme d'hydroxyde, lequel reste à l'état colloïdal dans l'eau. Les acides du sol, tels que l'acide humique, exercent également une action antiseptique sur certains microbes. On sait, par exemple, que le bacille d'Eberth (bacille typhique) est sensible à leur action. Avec l'accoutumance, les microbes nocifs arrivent à ne plus être très sensibles aux acides humiques.

Voici comment on peut expliquer l'accoutumance d'un germe à une substance antiseptique quelconque, quand une contaminalion est tant soit peu abondante. Figurons-nous, en effet, un groupe de microbes formant une colonie (fig. 78). Il y a des microbes extérieurs à la colonie et des microbes intérieurs. Les premiers seront immédiatement en contact avec le corps antiseptique et périront rapidement. Les derniers au contraire, ne recevant que progressivement le corps nocif, auront le temps de s'accoutumer et résisteront à leur action antiseptique.



Fig. 78. — Groupe de microbes formant une colonie.

Le même fait se reproduira toutes les fois qu'une colonie de microbes quelconque sera à l'abri d'une action antiseptique trop rapide.

Les auteurs qui ont voulu étudier la vitalité du bacille d'Eberth dans le sol sont arrivés à des résultats très contradictoires. Certains trouvent que dans des conditions d'asepsie complète, le bacille d'Eberth peut vivre de 3 à 90 jours. Entre ces deux extrêmes il y a une très grande marge et on a seulement opéré avec des cultures de laboratoire. On peut se demander si, avec

des germes très virulents sortant de l'intestin humain, on ne pourrait encore dépasser cette limite de 90 jours. Ces résultats discordants tiennent aux conditions différentes dans lesquelles se sont placés les différents auteurs. Certaines favorisaient plus ou moins l'accoutumance des germes au milieu dans lequel on les introduisait. D'autre part, le bouillon de culture servant à déceler la vitalité de ces germes a ici une très grande importance.

Tel expérimentateur qui emploiera peu de microbes se mettra dans des conditions moins bonnes pour obtenir l'accoutumance de quelques cellules que celui qui en emploiera beaucoup. Enfin nous avons reconnu que l'eau dans laquelle le bacille d'Eberth avait macéré quelque temps (8 à 10 jours), pouvait ensuite servir à conserver très longtemps vivants les germes de cette espèce. De l'ensemble de tous ces faits il résulte que l'action chimique naturelle est très complexe et fort aléatoire. On ne peut guère compter sur elle avec confiance.

Action biologique.

Dans le sol, sous l'influence des microbes, la matière organique s'oxyde et se transforme, comme termes ultimes, en acide carbonique, azote nitrique, eau, hydrogène, etc.

Cette transformation exige la présence d'oxygène et de carbonate de chaux pour s'accomplir complètement.

Dans les sables, si l'oxygène nécessaire à la nitrification est présent, il manque très souvent la quantité de chaux nécessaire.

Les liquides provenant des purins ou des fosses d'aisances, très riches en matières organiques, nitrifient alors très difficilement dans les sables. Un puits creusé dans ces terrains, quoique filtrants, n'est donc pas à l'abri des contaminations voisines.

Nous avons déjà dit, à l'occasion de la filtration, que,

malgré la *force adhésive*, les microbes, retenus à la surface des grains de sable, peuvent se multiplier dans ces liquides, riches en matières organiques. Les cellules glissent à la surface du sable et, de proche en proche, gagnent la nappe souterraine qu'elles contaminent.

Les eaux de purins, diluées suffisamment, nitrifient bien mieux et en raison du pouvoir filtrant des sables ne peuvent contaminer les eaux phréatiques de ces terrains.

Dans les sols calcaires, au contraire, la nitrification est excessivement active tandis que la filtration y est à peu près nulle. Au fur et à mesure que l'eau se débarrasse de ses matières organiques, la vie des germes pathogènes, comme le bacille d'Eberth, devient très difficile.

La disparition de ces germes n'est pas instantanée. Elle n'est que progressive et, d'après ce que nous avons dit au sujet de l'accoutumance, on se rend très bien compte que certains de ces germes deviendront plus résistants à l'influence nocive des eaux de plus en plus pauvres en matières organiques.

L'action biologique produit également une destruction énergique des germes pathogènes.

On sait depuis longtemps que si on introduit dans une eau de source ordinaire non stérilisée, des bacilles typhiques, en grande quantité, il devient bientôt très difficile de déceler ceux-ci à l'analyse.

On introduit ainsi une quantité de germes typhiques dépassant de beaucoup la quantité de microbes que ces eaux contiennent. On ne peut expliquer la disparition de ces germes que par l'influence de la concurrence vitale.

En remplaçant l'eau ordinaire par la même eau stérilisée à travers une bougie Chamberland, on arrive très facilement à déceler les germes typhiques introduits. Ce sont donc bien les autres germes de l'eau qui les avaient fait disparaître.

On sait qu'il existe un certain nombre de germes

capables de détruire les bacilles d'Eberth et le bacillus coli. Emmerich et Fehrs, Otto-Huntemüller ont trouvé, par exemple (1), que les protozoaires font disparaître ces germes de l'eau en trois ou quatre jours.

On a également signalé un certain nombre de microbes tels que le bacille *pyocyanique*, par exemple, et les *streptocoques*, détruisent le bacille d'Eberth. C'est également par une influence biologique que les germes, retenus à la surface des grains de sable, sont détruits. C'est cette influence qui semble la cause la plus énergique de la disparition des germes suspects dans les terrains calcaires. Après une épidémie de fièvre thyphoïde d'origine hydrique on constate une disparition rapide de la maladie bien qu'il subsiste encore des germes typhiques dans le sol. Ainsi, à Besançon, en 1902, une épidémie de fièvre typhoïde se déclara. En recherchant la cause de cette épidémie on s'aperçut qu'elle était probablement due à la contamination de la source d'Arcier, captée pour l'alimentation de cette ville, par les déjections typhiques du village de Nancray. Ce village est parcouru par un ruisseau qui se perd dans les calcaires jurassiques et dont les eaux viennent rejoindre la source d'Arcier.

Comme toujours les fosses d'aisances étaient proches du ruisseau et les linges étaient lavés à la rivière. Les germes jeunes et virulents des nombreux typhiques de ce village se trouvaient ainsi entraînés par les eaux engouffrées.

La ville de Besançon fut atteinte par la fièvre typhoïde aussitôt que ces germes, véhiculés par l'eau, arrivèrent chez le consommateur.

Quand l'épidémie de Nancray eut disparu, celle de Besançon cessa également. Et cependant, il est évident, d'après ce qu'on sait sur l'hydrologie souterraine de ces terrains, qu'une certaine quantité de ces germes devait encore exister dans l'eau des lacs souterrains, au milieu

(1) Otto-Huntemüller, *Destruction des bactéries de l'eau par les protozoaires.*

des multiples méandres des canaux souterrains. Ces germes ou bien ont perdu leur virulence ou bien sont morts en cours de route; toujours est-il qu'ils furent sans grande influence sur les organismes qui absorbèrent par la suite l'eau qui les contenaient. Dans ce cas, c'est surtout à la concurrence vitale qu'on attribue la purification de ces eaux.

Cet examen rapide montre que la nature a multiplié les causes d'épuration naturelle. Cette constatation était à prévoir parce que, sans ces obstacles nombreux, les germes nocifs auraient eu depuis longtemps raison de notre organisme. Aucun d'eux n'a une action certaine, c'est entendu, mais, chose assez remarquable, on s'aperçoit que lorsqu'un moyen d'épuration manque dans un terrain, il semble être remplacé par un autre.

Le tableau ci-dessous met en regard les procédés naturels d'épuration dans les terrains perméables en grand et perméables en petit :

Terrains perméables en petit.	Terrains perméables en grand.
Filtration.	Décantation.
Oxydation et nitrification.	Nitrification.
Action des silicates.	Radioactivité ? ?
Concurrence vitale.	Concurrence vitale.

Leur total est sensiblement le même dans les deux cas, toutes réserves faites relativement à leur importance.

QUATRIEME PARTIE

CAPTAGE DES EAUX

I

EAUX SUPERFICIELLES

Quelle que soit l'eau dont on dispose, il faut la capter, c'est-à-dire l'amener par un moyen quelconque à la portée de celui qui désire l'utiliser.

Suivant qu'on s'adresse aux eaux de surface ou aux eaux de profondeur les moyens sont très différents. Nous passerons rapidement en revue les procédés pour capter ces eaux.

Citerne. — On recherche, dans les campagnes, à se procurer des eaux aussi facilement que possible pour subvenir aux multiples besoins d'une exploitation. Sur certains plateaux, très riches et faciles à cultiver, l'eau souterraine est trop profonde. Les difficultés de puisage pour une exploitation agricole deviennent, en effet, assez grandes quand la profondeur des puits dépasse trente mètres.

La nécessité force quelquefois les cultivateurs à s'installer sur les plateaux fertiles mais pauvres en eau et à user d'expédients pour se procurer des eaux potables.

La citerne est dans ces régions le meilleur et le plus économique de ces expédients pour une exploitation ne consommant de l'eau que pour les besoins de la ferme. D'après ce que nous avons dit dans un de nos premiers

chapitres, une exploitation possédant 2 chevaux, 4 vaches et 100 moutons doit disposer d'un minimum de 1 200 litres d'eau par jour. La citerne devra emmagasiner cette quantité d'eau minima dans les périodes les plus sèches.

L'eau reçue dans les citernes est l'eau de pluie qui, ruisselant sur les toits, est amenée au moyen de tuyaux dans des réservoirs artificiels.

On ne récolte pas ainsi toute l'eau, une partie évaluée à 25 p. 100 de la hauteur d'eau tombée s'évapore surtout en été.

Souvent, dans les campagnes, on cherche à augmenter la quantité d'eau disponible en créant des mares. Lorsqu'on ne peut en créer, comme c'est le cas pour certains plateaux très perméables, on sera réduit à n'élever que la quantité de bétail, proportionnée à la quantité d'eau disponible. Les recherches d'eau ont donc bien pour l'agriculture une importance de premier ordre.

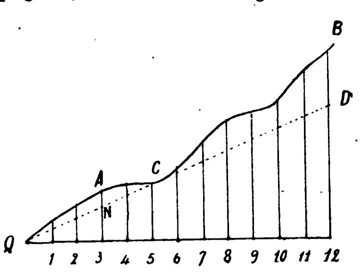


Fig. 79. — Courbe tirée de l'ouvrage de Debauve et Imbeaux servant à déterminer la capacité à donner à une citerne.

Quelle capacité faut-il donner à la citerne pour récolter le plus d'eau possible pour une étendue donnée de bâtiments.

Voici, à titre d'exemple, la méthode que MM. Debauve et Imbeaux préconisent.

« On dispose à Paris d'une surface de réception de 1 000 mètres ; quelle capacité faut-il donner à une citerne pour utiliser le mieux possible l'eau pluviale pendant une année sèche telle que 1893, et quel débit journalier peut-on espérer? (fig. 79).

« L'annuaire de Montsouris nous donne pour les hauteurs de pluies en millimètres de 1893 :

Déc. 1892.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov. 1893
45	53	55	6	0	46	42	76	17	41	84	42

« Sur une surface de 1 000 mètres carrés avec le coefficient 0,7, on pouvait donc recueillir et avoir emmagasiné à la fin de chaque mois les volumes suivants en mètres cubes.

Déc. 1892.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov. 1893.
31	70	108	113	113	145	174	227	239	268	327	357

« Portons sur un axe horizontal les douze mois et en ordonnée les volumes cumulés qui précédent. Nous aurons la courbe QABC, qui représente les cubes qu'on pourrait avoir en magasin si la consommation était nulle.

« Nous pouvons construire de même la courbe de consommation, il est clair qu'elle ne doit jamais s'élever au-dessus de la précédente, elle peut au plus la toucher, et et si cela arrive c'est que le magasin d'eau est épuisé.

« Le maximum de la consommation uniforme qu'on puisse obtenir est donc indiqué par la courbe ACD qui passe au point le plus bas de la première courbe et ce maximum correspond au point C, 113 mètres cubes en 150 jours, soit 750 litres par jour.

« Le volume a adopter pour la citerne est mesuré par la plus grande distance verticale N-A entre les deux courbes ; ce volume est de 47 mètres cubes. »

On voit donc qu'il faut, pour disposer de 150 litres par jour, une citerne d'environ 50 mètres cubes de capacité et un toit d'une superficie d'environ 1 000 mètres carrés.

Construction d'une citerne. — La citerne est un réservoir qui doit conserver l'eau aussi fraiche que possible. Nous avons vu que cette qualité de l'eau est

indispensable. D'après MM. Debauve et Imbeaux, la citerne ne doit pas être très profonde parce que sous une certaine pression les maçonneries ne sont jamais étanches. On recommande de ne pas dépasser la profondeur de trois mètres en ménageant, dans le fond de la citerne une bonde qui permettra de faire le nettoyage et d'enlever facilement les boues noirâtres qui s'y disposent.

La forme la plus simple et la plus économique est la forme circulaire surmontée d'une calotte sphérique. Il est inutile d'enfoncer toute la citerne dans le sol. On peut simplement entailler celle-ci sur $2^m,50$ à 3 mètres et la partie de la citerne qui surplombe le sol doit être surmontée d'une couche de terre d'environ $0^m,50$.

Il faut pouvoir accéder à la citerne par un regard suffisant pour laisser passer un homme. Pour prendre de l'eau on y adapte une pompe. Si on est à flanc de coteau, on peut placer sur le fond un tuyau d'évacuation.

La citerne doit être complètement étanche, sans aucune fissure, sinon elle serait susceptible de recevoir des eaux de fumier ou de purins, par conséquent de se contaminer.

Qualités des eaux de citernes. — En théorie l'eau de citerne est de l'eau de pluie, ne renfermant que des traces infimes de matière salines, mais exempte de toute contamination. En pratique, il n'en est pas ainsi. L'eau de pluie serait très pure si elle tombait dans une région où l'air est lui-même très pur, sur des toits exempts de poussières. On sait que l'air peut être vicié par les usines voisines. Cette contamination est cependant fort rare parce que les campagnes où les citernes sont établies ne peuvent généralement pas fournir l'eau nécessaire aux industries qui désireraient s'y installer.

Il est presque impossible d'obtenir une propreté méticuleuse du toit qui sert à la récolter.

Si, après une pluie, l'eau a lavé ce dernier et enlevé

toutes les poussières qui s'y étaient déposées, il ne

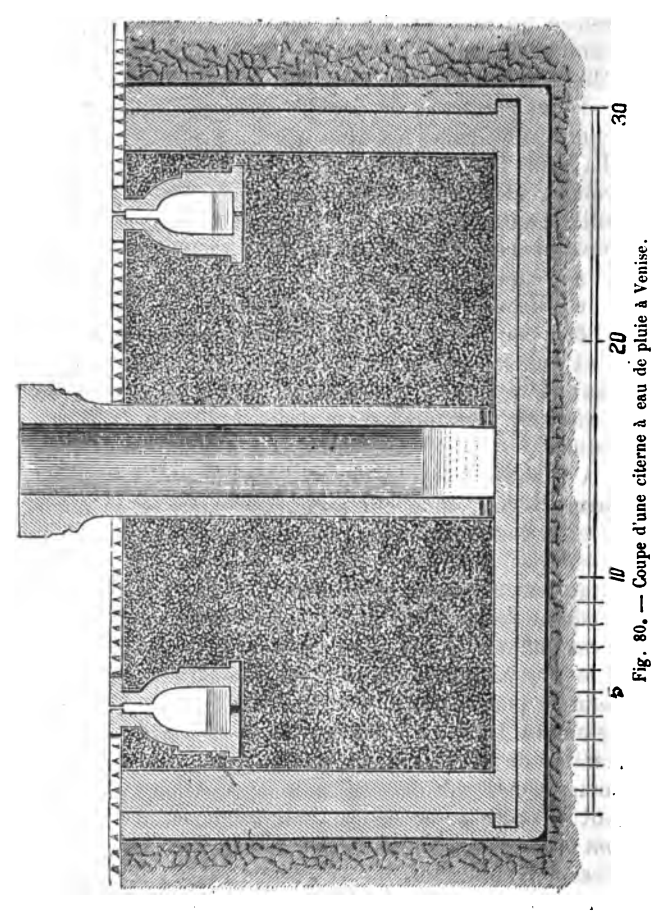


Fig. 80. — Coupe d'une citerne à eau de pluie à Venise.

tardera pas à se salir à nouveau. La pluie suivante entraînera ces nouvelles poussières ou des débris organiques.

Si on récoltait cette eau telle quelle, on aurait très rapidement au fond de la citerne une boue assez épaisse qui entrerait bientôt en décomposition et communiquerait aux eaux une odeur et un goût très désagréables.

Ces défauts étaient connus des Romains qui, comme Pline, considéraient que les eaux des citernes étaient croupissantes.

A Venise, avant la rencontre d'une eau fraîche et profonde, on s'alimentait au moyen de citernes. On évitait une partie des inconvénients de ces eaux en les faisant filtrer à travers du sable avant qu'elles n'arrivent dans le réservoir central où elles étaient puisées (fig. 80). On récoltait des eaux à peu près propres, en laissant perdre les premières portions de la pluie qui lavent les toits et entraînent la majorité des poussières du toit. Des appareils automatiques accomplissent cette besogne avec beaucoup de régularité.

Comme le sable ne filtre guère quand il est noyé, à notre avis, il vaudrait mieux prendre un autre dispositif qui est le suivant :

En A se trouve un réservoir métallique de capacité suffisante pour pouvoir récolter le volume d'eau maxima qui tombe sur le toit en vingt-quatre heures. Sa capacité peut être calculée dans le bassin parisien en se basant sur une pluie maxima de 35 millimètres. La base de ce réservoir est fermée par une plaque filtrante, en mortier maigre, en usage dans les filtres à sables. Au-dessous de cet aggloméré se trouve une plaque de tôle percée de nombreux trous, de façon à résoudre l'eau en pluie. Celle-ci est recueillie sur un filtre à sable fin de 1 mètre de profondeur. A la base de celui-ci se trouve la conduite qui dirige ces eaux vers le réservoir (fig. 81).

Un tel dispositif est dispendieux. Il faut, en outre, le mettre à l'abri des gelées d'hiver. Dans une exploitation on obviera en partie à ces inconvénients en ayant deux citernes, l'une pour les eaux potables destinées à l'ali-

mentation des personnes, l'autre pour les eaux servant à l'alimentation des animaux. On se contenterait de filtrer ces dernières à travers une dalle filtrante.

Le soin qu'on prend pour bien filtrer l'eau avant qu'elle n'arrive à la citerne, permet de diminuer le nombre des curages de la citerne elle-même. Cette opération présente de graves inconvénients quand on ne dispose d'aucune autre eau pour assurer l'alimentation. Certains auteurs recommandent alors l'emploi de plusieurs citernes de façon à ne faire le curage que successivement, mais cette solution n'est pas très économique.

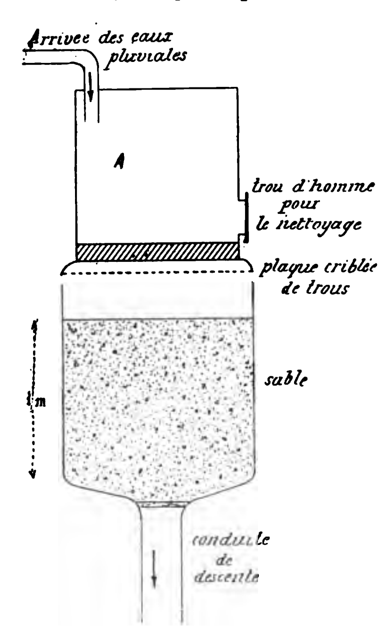


Fig. 81. — Purification des eaux de pluie alimentant une citerne.

Les filtres, au contraire, doivent être placés de façon à pouvoir être très facilement nettoyés. On n'a pas ici l'inconvénient signalé plus haut, ce nettoyage pouvant être fait en toute saison sans être obligé de vider la citerne.

Mares. — La mare n'est autre qu'un réservoir à l'air libre, installé sur un sol peu perméable, capable de recueillir les eaux des toits et des chemins. Au sens propre du mot elle ressemble donc beaucoup à la citerne.

Si la surface de récolte des eaux d'une citerne est sale, celle d'une mare l'est encore plus puisqu'elle est constituée par le sol lui-même qui reçoit tous les déchets de la vie.

Une mare est obtenue en creusant un trou dans la partie déclive d'un terrain très argileux. Si on ne dispose pas d'un terrain suffisamment imperméable, on en bétonne le fond.

On construit des mares dont la capacité est fort variable. Pour l'évaluer approximativement avant la construction, on délimite au pied levé la surface drainante possible dont les eaux peuvent arriver à l'endroit choisi par simple gravitation. On estime que la moitié des eaux tombées s'évapore, l'autre moitié profite seule à la mare.

On trouve, en employant la même méthode indiquée précédemment pour les citernes, la capacité qu'il faudra donner à la mare.

La qualité des eaux, avons-nous dit, laisse à désirer. Ces eaux boueuses une fois arrivées à la mare deviennent stagnantes et se décantent. Les matières organiques en suspension se déposent. Les mares sont donc formées d'un fond de boues, lesquelles se décomposent en été, et donnent naissance à des bulles de gaz.

Ces eaux sont croupissantes et ont ainsi un goût très désagréable. La lumière, le soleil, la concurrence vitale contribuent à l'épuration de ces eaux.

La mare sert d'abreuvoir comme au lavage du linge. Ces eaux se contaminent tous les jours. Pour remédier en partie à cette situation il serait utile de créer dans les villages des mares spéciales pour l'alimentation des animaux et d'autres pour y installer les lavoirs. C'est une mesure simple qu'on a commencé à prendre dans quelques villages et dont on s'est fort bien trouvé.

Il est nécessaire également de défendre l'accès d'une mare contaminée par des animaux malades qui sont venus s'y abreuver.

De nombreuses épidémies épizootiques se propagent très souvent par leur intermédiaire. Ainsi près de Chigy (Yonne) plusieurs cas d'entérite aiguë se sont déclarés chez des chevaux qui allaient boire à une mare où précédemment un animal malade s'était rendu.

En règle générale l'homme ne devrait jamais boire cette eau croupissante. Dans les pays pauvres, où les toits sont en chaumes et par conséquent où il ne peut être construit des citernes, ou des puits, l'eau de mare reste la seule eau d'alimentation pour toutes les exploitations agricoles.

Étangs. Lacs. — L'alimentation des lacs et des étangs se fait soit par un petit cours d'eau, issu de sources véritables, soit encore par des eaux de ruissellement. On connaît les grands étangs de la plaine de Trappes qui fournissent des eaux potables à la ville de Versailles. Ils sont alimentés par des tranchées récoltant les eaux superficielles ruisselant sur ce plateau. Au contraire les lacs suisses récoltent des eaux venant des glaciers, véritables réservoirs solides pour les eaux des pluies.

L'eau des étangs et des lacs est donc soumise aux mêmes causes d'infection que les mares. Elle reçoit les contaminations entraînées par les eaux de ruissellement. Elle en récolte d'autres sur ses bords venant des habitations installées en ces endroits.

Le phénomène d'épuration est essentiellement fonction du temps. Les eaux d'étangs ont un séjour moindre que celles des lacs, et par conséquent sont moins pures. Ainsi les eaux des étangs de Versailles sont toujours louches, parce qu'elles n'ont pas eu le temps d'abandonner les dépôts très fins et argileux récoltés sur leur parcours; elles sont aussi très chargées en microbes.

Dans les lacs de très grande étendue, constituant un vaste réservoir, il se fait au bout d'un certain temps un dépôt qui clarifie les eaux. En certains endroits l'épuration devient telle que l'eau y est excessivement pure.

Ainsi dans le lac de Genève, au centre et à 15 mètres de profondeur, on ne trouve guère que *20 à 40 germes* au centimètre cube (Dunant) et la température y est très uniforme.

En ayant soin de bien connaître le point où la prise d'eau doit être faite pour obtenir une eau fraîche, exempte de contamination, l'eau des lacs présente un caractère de potabilité suffisant.

En principe, la prise d'eau doit être faite le plus loin possible des rives. Cette précaution n'est guère possihle que pour l'alimentation des grandes villes telles que Zurich, Genève, Chicago, Cleveland, etc., parce que les dépenses de premier établissement ne sont pas un obstacle. On va chercher l'eau au moyen d'une conduite dans l'endroit où les analyses ont montré que l'eau était la plus fraîche et la plus pure.

Il faut toutefois agir avec prudence. Quand on fait une prise d'eau au milieu d'un lac la circulation de ses eaux est changée. Une eau, très pure avant la prise, peut de la sorte devenir contaminée une fois les travaux faits. En outre, dans les lacs des régions tempérées, la circulation des courants n'y est pas la même en été qu'en hiver. Aux époques de transition, il y a des périodes où la pureté des eaux est troublée.

M. Léon Massol a trouvé que la vase du fond peut être remuée par les vagues provoquées par le vent venant de certaines directions.

C'est pourquoi on épure l'eau des lacs peu profonds.

Dans les exploitations agricoles, ces eaux sont surtout recherchées pour leur fraîcheur et leur faible minéralisation.

Barrages-réservoirs. — En Amérique surtout on a, en barrant les rivières, créé de grands lacs artificiels constituant de vastes réservoirs. Dans les terrains argileux, certaines rivières ne coulent que pendant la saison humide. En barrant la vallée on retient un cube d'eau

suffisant qu'on lâche progressivement pour satisfaire aux besoins de l'exploitation.

L'emploi de barrages-réservoirs pour l'alimentation est peu répandu en France. On peut citer comme exemple celui de Roanne, emmagasinnant 4 500 000 mètres cubes.

Au contraire, à l'étranger, là où les sources sont trop peu abondantes pour pouvoir être captées, on a construit d'immenses réservoirs comme, par exemple, ceux servant à l'alimentation de la ville de Boston. Le nouveau réservoir de Jersey peut emmagasiner 33 000 000 mètres cubes d'eau, le réservoir de Crystal Springs, pour l'alimentation de San Francisco, peut contenir 117 335 000 mètres cubes; enfin les grands réservoirs du Croton et des digues supérieures doivent contenir la quantité d'eau suffisante pour alimenter 6 000 000 d'habitants.

Au point de vue de l'alimentation des exploitations agricoles, le barrage-réservoir pourrait servir aux irrigations ou à accumuler des eaux pour créer des forces hydrauliques tout le long d'une rivière torrentielle.

Pour établir un barrage-réservoir il faut généralement disposer d'un épanouissement de la vallée suivi d'un rétrécissement. Le terrain de base doit être imperméable de façon à ne pas perdre le bénéfice du barrage. Ces conditions sont assez difficiles à réaliser car certains plateaux, peu perméables, ont des vallées relativement perméables.

La partie la plus délicate dans la construction du barrage-réservoir est la digue qui doit pouvoir résister d'une façon parfaite, d'une part à la pression de l'eau et d'autre part aux influences de la température.

Un certain nombre de profils de digues a été présenté comme satisfaisant aux lois de la résistance des parois; on trouvera dans le livre de MM. Debauve et Imbeaux des exemples nombreux de digues construites dans différents pays, avec les détails des efforts qu'elles doivent et peuvent supporter.

En réalité, une exploitation agricole ne peut disposer de moyens suffisants pour construire les vastes réservoirs dans lesquels les conditions d'épuration et de fraîcheur des eaux se trouvent réalisées, car ils sont d'un prix de revient assez élevé.

Avec les petits réservoirs on retombe dans le cas des étangs ou des grandes mares. Ces eaux sont loin d'être parfaites comme qualité. Elles sont très sujettes aux contaminations et doivent être épurées pour les besoins d'une industrie agricole ou d'une alimentation en eau potable.

Il faut également veiller à ce que les eaux résiduaires des usines situées à l'amont ne viennent pas contaminer les eaux. Ceci augmente encore les frais de premier établissement de tels réservoirs parce que cette condition n'est efficace qu'en indemnisant les intérêts industriels lésés.

On préconise, pour améliorer la qualité de ces eaux, de créer des prairies qu'on irriguera et dont les eaux, récoltées au moyen de drains collecteurs, seront conduites au barrage-réservoir. On ferait ainsi un premier filtrage à peu près identique à celui qu'on préconise pour la citerne.

Très souvent encore on irrigue avec elles les prairies en aval du réservoir et on les récolte ensuite par drainage.

On obtient ainsi une deuxième filtration qui améliore beaucoup leur qualité.

Pour terminer nous signalerons que d'après Kruse la prise d'eau dans le réservoir doit être faite aussi loin que possible du point d'entrée des affluents et non loin du fond.

II

EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines sont très recherchées à cause de leur limpidité et de leur fraîcheur.

Leur captage est donc une question très importante pour une exploitation agricole.

Nous avons vu comment on peut fixer l'emplacement d'un puits pour obtenir une eau abondante et pure. Il faut maintenant chercher à la capter aussi économiquement que possible.

On distingue le captage à faible profondeur et le captage profond. Au premier se rattache : le captage des sources, les puits ordinaires et tubulaires, les drainages avec ou sans infiltrations artificielles, les galeries et puits filtrants le long des cours d'eau.

Au second se rattache les puits ou forages artésiens, descendus très bas, les galeries captantes ou galeries de mines.

Captage des sources. — Depuis quelques années sous l'influence des progrès réalisés en hydrologie et en hygiène, le captage rationnel d'une source est entouré de nombreuses précautions.

Autrefois on se contentait, après avoir bien nettoyé le fond de la source et régularisé ses contours, de placer sur l'émergence une cloche en maçonnerie qui, d'un côté se prolongeait par une canalisation de dimension plus ou moins longue jusqu'au point d'utilisation de ces eaux.

Depuis, on a reconnu qu'en captant les eaux ainsi, on arrivait à prendre, non seulement les eaux de la nappe souterraine, mais encore les eaux superficielles entraînant les contaminations voisines.

Dans une conférence faite à la Société géologique de France, M. Léon Janet développa les idées suivantes :

« Le captage d'une source d'eau potable a pour but essentiel de la mettre à l'abri de toutes les contaminations pouvant se produire au voisinage du point d'émergence, et spécialement dans le trajet que l'eau effectue entre le gisement géologique de la nappe et la surface du sol. Il faut donc obtenir de l'eau provenant uniquement de la nappe souterraine, sans la laisser se mélanger, ni avec les eaux de ruissellement, en cas de grande pluie, ni avec les eaux suspectes de nappes plus rapprochées de la surface.

« C'est une question qui est presque toujours laissée de côté ; lorsqu'il s'agit d'utiliser une source, on se borne à prendre l'eau telle qu'elle sort du sol ; lorsqu'on a bien nettoyé le bassin de la source et lorsqu'on l'a entourée d'un pavillon fermé, on croit avoir pris toutes les précautions possibles. En réalité l'eau ainsi pure est recueillie, elle n'est pas captée.

« Ces principes surannés ont eu pour eux, il est vrai, la haute autorité de Belgrand qui estimait qu'il était mauvais de toucher aux sources, et qu'il suffisait, pour éviter toute contamination, de tenir, autant que possible, le niveau des sources au-dessus de celui des eaux voisines.

« La précaution est certainement excellente, mais en admettant qu'elle puisse être observée dans les périodes pluvieuses ; elle ne donne d'ailleurs, à elle seule, que des garanties tout à fait insuffisantes.

« Ce qui fait que cette question de captage des eaux potables a été tellement négligée jusqu'à ce jour, c'est qu'on n'a presque jamais, pour la résoudre, fait appel à la science géologique.

« On comprend cependant qu'elle seule peut fournir la solution du problème, en indiquant la position des terrains contenant la nappe souterraine qui alimente la source. »



En réalité, jusqu'à ce jour, la question du captage n'a été étudiée que pour les eaux minérales.

Déjà en 1899 M. de Launay, dans son livre sur *La*

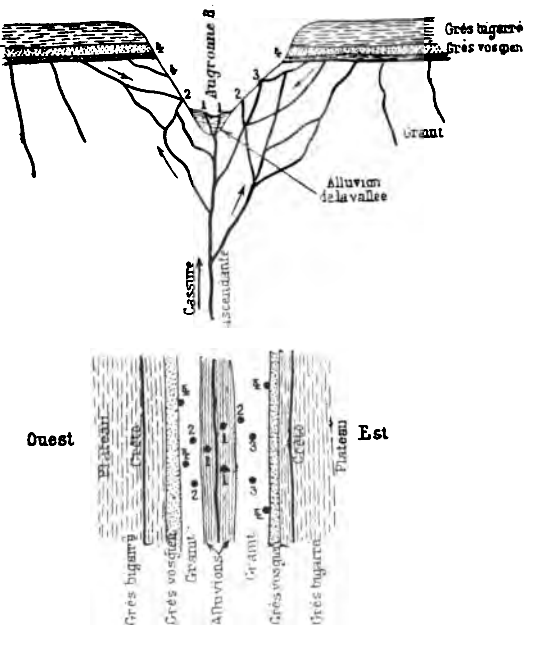


Fig. 82. — 1, 1, sources très chaudes; 2, 2, sources chaudes; 3, 3, sources froides; 4, 4, sources foides par déversement aux affleurements; 4, source froide par déversement d'une cassure, figure tirée de Debauve et Imbeaux, t. II, p. 191.

recherche, le captage et l'aménagement des sources thermo-minérales, avait réclamé pour capter les eaux potables les mêmes procédés employés pour les eaux minérales. Pour ces dernières, en captant dans le gisement géologique, on avait bien constaté des différences très sensibles de composition chimique qui s'expliquent très facilement

dans le schéma ci-dessus tiré du livre de MM. Debauve et Imbeaux sur les sources de Plombières (fig. 82).

Les eaux souterraines et minéralisées chaudes se trouvent mélangées avec des eaux superficielles et froides provenant des gneiss de la surface. En allant capter ces eaux en profondeur on augmente leur température et leur degré de minéralisation.

Mais, comme le dit M. de Launay :

« Sans doute, pour une eau potable, les variations seront plus difficiles à saisir. La nappe alimentant la source à capter se trouve à une profondeur généralement faible, et la composition chimique de l'eau qu'elle fournit peut se rapprocher beaucoup de celle des eaux tout à fait superficielles avec lesquelles elle se mélange. De plus, ces eaux superficielles n'entrent, la plupart du temps, sauf à la suite de fortes averses, que pour une très faible proportion dans le débit total de la source. Il en résulte que, en ne faisant que des analyses chimiques, on trouvera des compositions très analogues, avant et après le captage d'une source potable. Mais, par contre, l'analyse bactériologique doit fournir des résultats très différents.

« Il est vrai que lorsqu'il s'agit de l'utilisation d'une eau potable, le but n'est plus d'obtenir une eau ayant constamment la même composition chimique, mais de fournir une eau fraîche, ayant une proportion modérée de sels minéraux, contenant peu de matières organiques et exempte de microbes pathogènes. Mais on comprend sans peine que, si l'on ne prend pas des mesures pour empêcher les eaux de ruissellement d'arriver dans le bassin de la source, soit directement, soit après un très faible parcours souterrain, on sera exposé à avoir des contaminations graves.

« Dès lors, toutes les fois qu'on se trouve en présence d'une source d'eau potable, le captage doit avoir pour but de supprimer toute possibilité de contamination dans

la partie du circuit souterrain, comprise entre la nappe géologique et le point d'émergence, c'est-à-dire d'aller chercher l'eau à une profondeur telle que le mélange avec des eaux plus superficielles devienne impossible, ce qu'on obtiendra généralement en prenant l'eau dans son gisement géologique et l'amenant au jour par un conduit imperméable.

Fig. 83. — Captage d'une source d'affleurement (Debauve et Imbeaux).

« Considérons, par exemple, une source d'affleurement émergeant à flanc de côteau (fig. 83). La plupart du temps le sous-sol géologique est recouvert, sur les pentes, d'éboulis meubles à travers lesquels l'eau de la source circule avant d'arriver au jour, en sorte que le point d'émergence est sensiblement plus bas que la surface supérieure de l'assise imperméable qui retient la nappe alimentant la source. Les éboulis sont formés souvent de couches parallèles à la pente du terrain, et il peut y circuler, surtout après les averses, des eaux qui viendront se mélanger avec celles de la nappe souterraine, en les contaminant gravement.

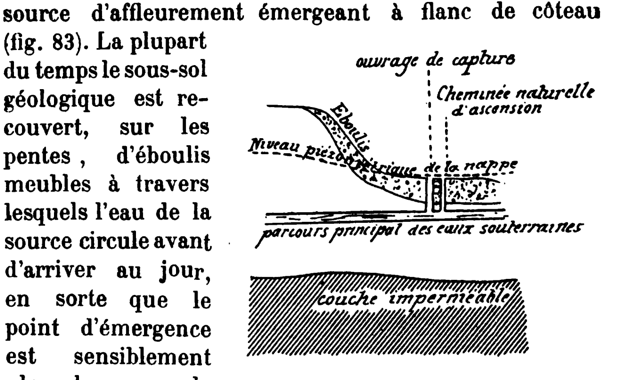


Fig. 84. — Captage par forage d'une source de thalweg.

Dès lors, un ouvrage rationnel de captage doit simplement comprendre une galerie horizontale dont la base se trouve à la partie supérieure de la couche imperméable retenant la nappe.

« Si nous prenons une source de thalweg (fig. 84), l'eau se fera jour généralement à travers une couche d'alluvion, garnissant le thalweg, et il faudra aller la chercherpar un forage tubé, ou un puits vertical cimenté jusqu'à son gisement géologique.

« Les nappes qui alimentent ces sources de thalweg se trouvent très fréquemment dans des calcaires fissurés. Il existe alors, dans ces calcaires, une zone de parcours principal des eaux souterraines, où celles-ci, dissolvant le calcaire, ont fini par former de grandes cavernes. Si une de ces cavernes vient à s'effondrer dans le thalweg, il s'établit, par la cheminée, une communication entre la nappe souterraine et la surface du sol, et comme la nappe souterraine libre, sous les plateaux, est captive sous la vallée, l'eau jaillit à la surface du sol en donnant une source.

« Il peut arriver toutefois que le puits entrepris pour opérer le captage ne rencontre pas de fissure ; en ce cas on doit le compléter par une galerie partant de la base du puits et poussée perpendiculairement à la direction des principales fissures.

« On comprend de suite, d'après les deux figures schématiques ci-dessus, qu'on peut généralement capter une source d'affleurement plus haut que son point d'émergence, mais qu'on ne peut augmenter son débit, tandis que pour une source de thalweg, à la seule condition qu'elle ne constitue pas l'unique exutoire d'une nappe souterraine, le débit peut être beaucoup augmenté en abaissant le plan d'eau dans l'ouvrage de captage.

« Il est vrai que cet abaissement ne doit être effectué qu'avec les plus grandes précautions, car si le niveau dans l'ouvrage de captage est inférieur à celui des eaux

superficielles voisines, il est à craindre que celles-ci ne s'infiltrent à travers les alluvions jusqu'au gisement géologique de la nappe et gagnent l'ouvrage de captage, après un parcours insuffisant pour les épurer d'une manière complète. Dans tous les cas, même lorsque le plan d'eau, dans l'ouvrage de captage, est tenu au-dessus du niveau des eaux voisines, il est bon d'obturer les canaux naturels d'emergence au moyen d'un corroi d'argile.

« La simple application de ces principes a permis, tout récemment, d'utiliser pour l'alimentation publique certaines sources jaillissant au milieu de marais tourbeux, à travers une épaisseur considérable d'alluvions et se trouvant dans des conditions si défavorables que le comité consultatif d'hygiène avait cru devoir proposer de les écarter.

« On pourrait objecter que cette méthode occasionnant des dépenses considérables conduira certaines municipalités à renoncer à l'adduction des sources, et à continuer à utiliser les eaux de rivière d'une qualité inférieure à celle d'eaux de sources, même mal captées.

« Je répondrai que, dans le cas d'une source d'affleurement, où il n'y a pas d'épuisement à assurer, la dépense est toujours faible, et que, dans le cas d'une source de thalweg, le captage peut souvent s'effectuer à peu de frais au moyen de forages tubés. C'est seulement dans le cas où l'emploi de forages venant à échouer, par suite du trop grand écartement des fissures de la roche aquifère, il faut recourir à des puits et à des galeries, que la nécessité d'un épuisement important, ou de l'emploi soit de l'air comprimé, soit de la congélation entraîne des dépenses pouvant atteindre un chiffre très élevé. »

Nous donnons, à la suite, quelques exemples de captage faits aux sources captées par la Ville de Paris dans les régions du Loing, de la Vanne. Ce sont des sources de thalweg. Celles-ci sont, pour la plupart,

captées dans la craie, c'est-à-dire dans un terrain fissuré.

La figure 85 est un captage fait par forage, la

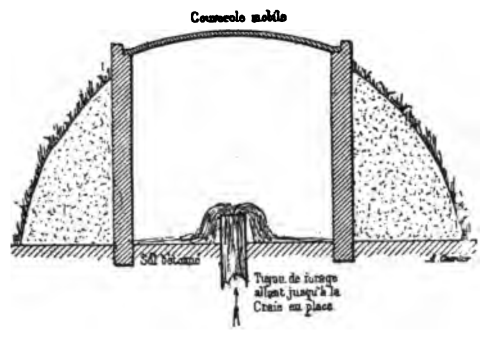


Fig. 85. — Chambre de captage de la source du sel (d'après MM. Debauve et Imbeaux).

figure 86 est un captage par galerie dans le gisement géologique.

Dans un terrain sablonneux il faut éviter l'ensablement de la source. Pour cela, nous empruntons encore au livre

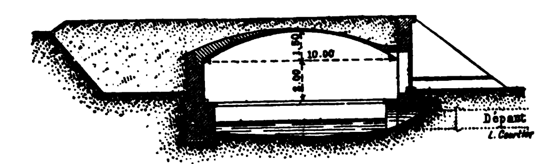


Fig. 86. — Pavillon de captage de la source d'Armentières (Vanne) (d'après MM. Debauve et Imbeaux).

de MM. Debauve et Imbeaux le dispositif employé pour le captage d'une source de la vallée de l'Eyb (Wurtemberg).

Dans la partie la plus reculée de la chambre on a disposé un massif de pierres sèches et de cailloux de façon à arrêter le sable. D'autre part la chambre elle-

même est disposée en trois compartiments, séparés les uns les autres au moyen de petits murs. L'eau passe à travers chaque compartiment et y dépose le sable qu'elle entraîne. Ce sont donc des bassins de décantation. La conduite d'amenée de ces eaux ne part qu'à partir du troisième compartiment.

La figure 87 représente le captage d'une source d'affleurement, mais quand on doit réunir le débit de plusieurs sourcettes, le mieux est de construire une galerie drainante au niveau de l'affleurement du terrain imperméable.

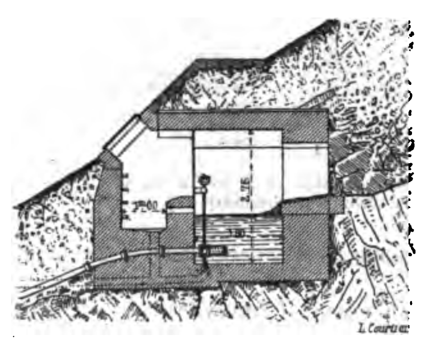


Fig. 87. — Captage d'une source à flanc de coteau.

Puits. — Pour creuser un puits il faut distinguer :

1° Les terrains argileux ;

2° Les terrains sablonneux ;

3° Les terrains fissurés et rocheux.

Terrains argileux. — Généralement, quand on creuse dans un terrain argileux, il se produit des hernies qui amènent des éboulements. Ceux-ci viennent combler le trou fait de main d'homme pour atteindre la nappe. Il y a donc danger à travailler dans de telles conditions. Il est nécessaire de blinder le puits et d'élever une maçonnerie dans son intérieur. Toutefois M. Imbeaux signale avoir vu dans le pays de Bray les puisatiers descendre profondément dans les argiles en se contentant de garnir les parois avec des branchages contournés en hélice.

Terrains sablonneux. — Il est généralement préfé-

rable de creuser un puits de petit diamètre dans les sables. Le procédé de construction est économique et rapide. Si on veut creuser un puits ordinaire, c'est-à-dire ayant de 0m,80 à 1m,50 de diamètre on se trouve en présence de quelques difficultés. A chaque instant il se produit des éboulements qui viennent combler le travail d'affouillement. On recommande dans ce cas l'emploi d'un rouet possédant à sa base une lame circulaire. Il suffit de creuser ou de draguer à l'intérieur du rouet en dégageant le sable sous le couteau. La masse entière s'enfonce progressivement par son propre poids. Si ce dernier n'est pas suffisant, on met une surchage sur le rouet. Quant à la

Fig. 88. — Puits abyssin.

maçonnerie, on a soin de la faire au fur et à mesure que le rouet descend. On évite ainsi les éboulements.

Si on veut simplement faire un puits par forage, on peut s'adresser à deux moyens. Lorsque la nappe n'est pas très profonde et si le terrain est très meuble, il suffit de descendre une série de petits tubes (de 5 à 10 centimètres de diamètre) qu'on visse ou rive les uns au-dessus des autres et qu'on enfonce au moyen d'un mouton (fig. 88) (c'est le puits abyssin).

Pour avoir de plus grands débits, on se sert de tubes de diamètre plus fort, allant jusqu'à 30 ou 40 centimètres, qu'on enfonce au fur et à mesure qu'un trépan descend dans le sol et dégage la base du tube.



Fig. 89.

Aux États-Unis, de nombreux puits ont été creusés dans le boulder-clay renfermant des graviers très durs. On a été obligé d'employer *les tove pipe well* (puits en tuyau de poêle). Ce sont des tubes tronconiques pouvant s'emboîter les uns dans les autres sans pas de vis. Ces tubes sont descendus au moyen de deux crics hydrauliques très puissants, et une pompe est chargée de ramener à la surface, au fur et à mesure du fonçage, les sables et les graviers. Quand les tubes sont en place, on pratique avec un appareil spécial, de longues entailles verticales qui, étant faites du dedans au dehors, vont en s'élargissant de l'extérieur vers l'intérieur et empêchent ainsi l'arrivée du sable.

Les puits, dans ces terrains, se comblent facilement par suite de l'arrivée progressive et continue d'eau

contenant du sable en suspension. Avec les puits abyssins, percés de trous plus ou moins fins suivant la grosseur des sables, on arrive assez facilement à empêcher les entraînements de sable ou mieux à les diminuer considérablement. Car, comme le font justement remarquer MM. Debauve et Imbeaux, il se fait généralement un vide (fig. 89), par suite de l'entraînement du sable et c'est dans ce vide qu'a lieu l'aspiration.

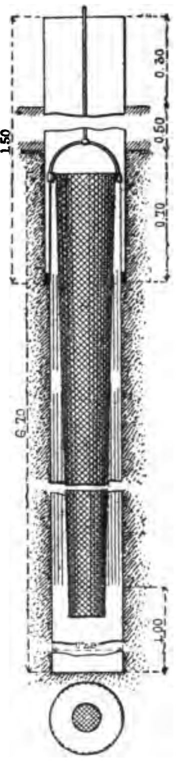


Fig. 90. — Puits tubulaire avec panier filtrant amovible, système Sonne.

Différents dispositifs ont été inventés pour remédier à l'entraînement des sables. Il y a d'abord le panier filtrant amovible de Sonne et Simons. C'est un panier formé de treillis en cuivre rouge avec mailles variant suivant les cas entre 0^{mm},2 et 2 millimètres. Il est descendu dans le fond du puits et l'eau doit le traverser avant d'être aspirée (fig. 90).

Un autre dispositif de Sonne et Simons est constitué par deux tubes concentriques entre lesquels on introduit une couche de graviers allant en augmentant de grosseur depuis l'extérieur jusqu'à l'intérieur (fig. 91). L'eau chargée de sable est obligée de passer à travers ces graviers, y dépose son sable. Elle est absolument pure et le puits ne se bouche pas par les sables. On peut même enlever le tube extérieur *a* après le remplissage, le filtre fonctionne parfaitement.

C'est ainsi que sont établis les puits tubulaires de Spire, des chemins de fer du Palatinat ou de Francfort-

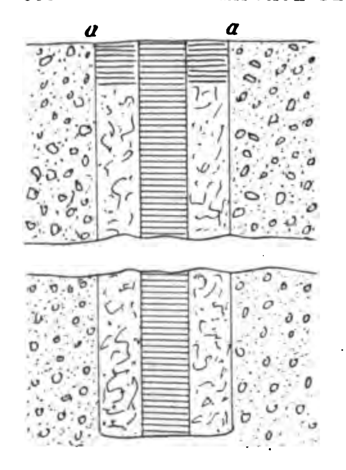


Fig. 91. — Premier puits Sonne et Simons.

sur-le-Mein. On peut employer également le cuvelage filtrant que Ed. Lippmann a utilisé à Rambouillet. C'est un tube de forme polygonale (fig. 92 et 93), dont la face extérieure est totalement faite de sortes d'alvéoles rectangulaires dont le fond est percé de trous. Dans ces alvéoles se logent des plaques poreuses ou filtrantes. La composition de ces plaques doit varier suivant la nature des sables contenus dans l'eau qu'on veut utiliser. Le cuvelage filtrant est fermé à sa base par un fond hermétique. Pour l'établir, on creuse un puits foré qu'on garnit comme d'ordinaire d'un tube en tôle pleine. Ceci permet de pénétrer dans les sables aquifères jusqu'à la profondeur nécessaire pour obtenir une hauteur de charge en rapport avec le volume d'eau qu'on veut avoir et qui est naturellement aussi fonction du diamètre du cuvelage

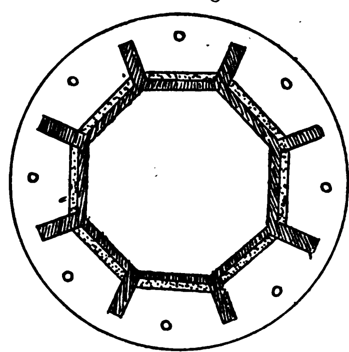


Fig. 92. — Coupe transversale du cuvelage filtrant de Lippmann.

filtrant. Puis on descend ce dernier dans le forage, en le

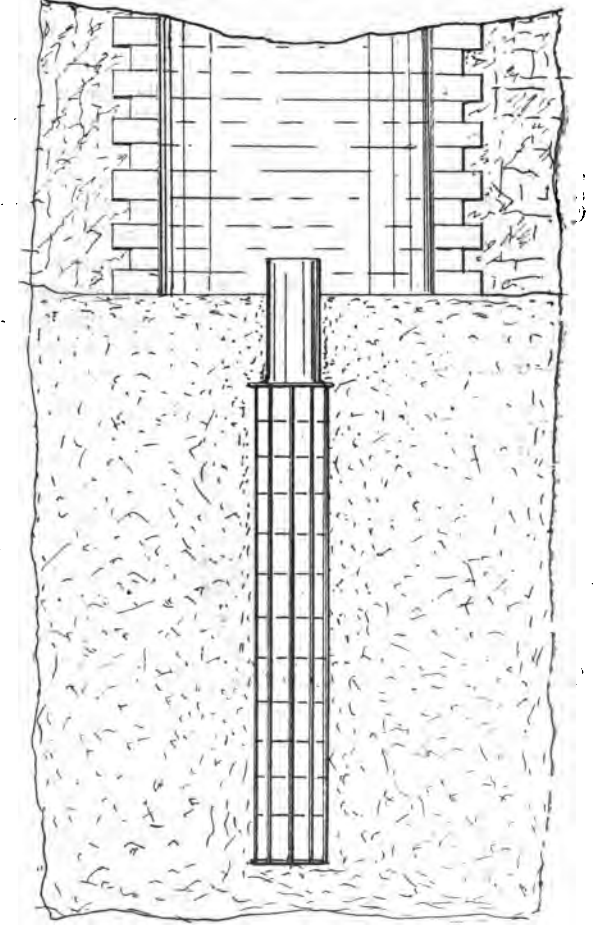


Fig. 93. — Cuvelage filtrant de Lippmann.

prolongeant à sa partie supérieure, c'est-à-dire pour

toute la portion qui doit émerger, par une longueur convenable de tuyaux absolument étanches.

On procède ensuite à l'extraction totale du tube en tôle pleine qui a servi à l'exécution du forage. Les sables aquifères se trouvent alors au contact des plaques de filtration ; l'eau de la nappe pénètre claire et limpide dans l'intérieur de l'appareil où elle est aspirée par une pompe. Le procédé de M. Putzeys diffère de celui de M. Lippmann par ce fait que le passage de l'eau a lieu à travers des lames de verre juxtaposées en paquet au lieu de plaques poreuses.

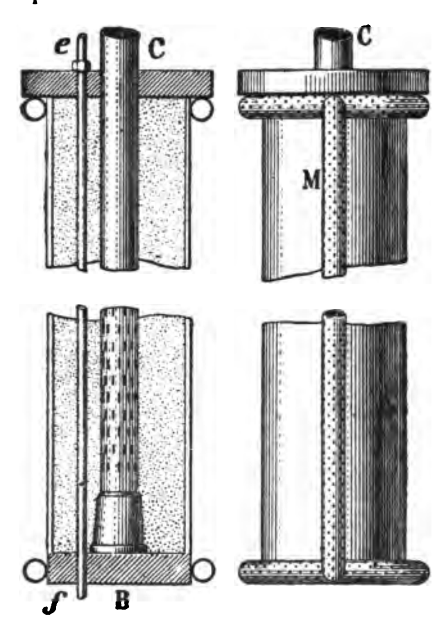


Fig. 94. — Puits hollandais d'après Van Hanselt.

En Hollande on a l'habitude de creuser de nombreux puits dans les sables. Voici le dispositif imaginé par l'ingénieur Van Hanselt tel que le décrivent MM. Debauve et Imbeaux.

« Un cylindre en tôle de $0^m,30$ de diamètre (fig. 94), monté sur une base en bois B, est rempli de gravier coquillier destiné à former filtre, et au centre on trouve un tuyau d'aspiration C. Le cylindre est fermé par un

couvercle en bois de diamètre supérieur à celui de la base; une tige en fer *ef* vissée dans la base du fond, est serrée par un boulon sur le couvercle supérieur. On voit, suivant deux génératrices du cylindre, deux tuyaux perforés M, réunis en haut et en bas par deux tuyaux annulaires, également perforés. Ce système de tuyaux est destiné à l'enfoncement de l'appareil; on y lance de l'eau sous pression qui fait bouillonner le sable fin et permet la descente progressive de l'appareil entier. (C'est le système appliqué au battage des pieux dans le sable fin.) Quand l'appareil a atteint la profondeur voulue, on dévisse la tige *ef*, on l'enlève, ainsi que le couvercle en bois et le cylindre extérieur avec son tuyau, et il ne reste dans le sol que le filtre avec son tuyau intérieur perforé. »

Enfin, en dehors de ces filtres spéciaux on a inventé des systèmes particuliers de crépines en fonte ou en cuivre pour arrêter le sable pendant le pompage.

Drainages. — Sous ce titre il faut entendre la captation d'eaux souterraines circulant à une faible profondeur. Ces eaux, captées au moyen de puits, ne donnent qu'un débit insuffisant. Récoltées au moyen de drains collecteurs, elles arrivent à former un volume suffisant pour satisfaire aux besoins de l'industrie agricole. D'autre part, il est évident que le drainage est souvent nécessaire à la culture, de telle sorte que ce travail est utile à la culture comme à l'exploitation.

Malheureusement, l'utilisation des eaux de drainage n'est pas plus pratiquée en France que la conservation rationnelle du fumier. On laisse perdre ainsi dans certains pays une partie des eaux qu'une simple tuyauterie établie à peu de frais permettrait de dériver par la gravité jusqu'à l'exploitation.

On trouvera dans le livre de MM. Risler et Wéry (*Drainage et irrigation*), des renseignements détaillés sur la façon de faire des drainages. Nous ne traiterons donc cette question que sommairement.

En Hollande, on a coutume de faire des canaux découverts dont les eaux viennent se réunir en un point pour être dirigées sur le réservoir. Elles ne servent à l'alimentation qu'après avoir été purifiées.

Il est cependant préférable de faire les drains couverts qui préservent mieux les eaux contre les contaminations immédiates.

M. Imbeaux a eu l'occasion d'appliquer ce système de captage à Toul et à Bressuire. Voici comment il le décrit : « *Aqueducs drainants*. En principe, la tranchée étant ouverte, si possible, jusqu'à la couche imperméable, on établit l'aqueduc drainant sur cette couche, avec des ouvertures pour l'entrée de l'eau (barbacane) dans les parois (des deux côtés si l'eau vient de part et d'autre, du côte ouvert si elle ne vient que de ce côté-là) ; lorsqu'on n'a pas atteint la couche imperméable, le radier lui-même peut être captant.

« Plusieurs types de drains ont été adoptés par nous, et ont bien réussi : on remarquera en avant des barbacanes un petit filtre en sable et galets pour empêcher les entraînements, et par-dessus la fouille un corroi en argile pour écarter les eaux de surface. Le type visitable est surtout à recommander, car on pourra toujours voir ce qui se passe, déboucher les barbacanes engorgées, nettoyer le radier, etc. Il vient d'être appliqué par l'un de nous à Toul, avec cette particularité intéressante que le produit d'aval a été exhaussé de $1^{m},50$ à 2 mètres audessus de la voûte, de manière à faire barrage et surélever le niveau de la nappe ; l'extrémité aval de l'aqueduc est prise dans un fort mur de retour qui fait l'office de serrement et par un robinet vanne on règle la prise d'eau suivant les besoins. »

Les terrains granitiques fournissent de l'eau dans les vallées, là où la roche compacte et presque imperméable est recouverte d'une couche d'éléments détritiques constituant le terrain perméable.

En drainant ces vallons transversalement, on peut se procurer l'eau potable nécessaire pour une forte agglomération.

Certaines villes de Bretagne comme Rennes ou Lorient se sont ainsi procuré leurs eaux d'alimentation.

M. Pochet, dans son ouvrage sur les sources, a montré les types de drains employés par ces villes bretonnes.

La Ville de Paris, dans la région de la Vanne, a récolté des eaux assez pures dans la craie, au moyen d'une galerie drainante.

A Flacy, par exemple, elle a pu obtenir 120 litres à la seconde, au moyen d'un aqueduc drainant de 4 kilomètres.

Ce captage par drains est également employé lorsqu'on renforce au moyen de l'irrigation certaines nappes souterraines insuffisantes aux besoins de la consommation, ainsi que nous le verrons par la suite.

Galeries et puits filtrants dans les alluvions d'une grande rivière. — L'eau des alluvions est captée par puits toutes les fois que la circulation à travers ces terrains est facile ; dans le cas contraire on creuse une galerie parallèle à la direction de la vallée. Cette galerie est en pierre sèche perméable aux eaux, ou bien est en maçonnerie avec, de distance en distance, des ouvertures appelées barbacanes (fig. 95). Quand on pompe un faible volume d'eau dans un de ces ouvrages de captage, on n'aspire, le plus souvent, que les eaux de la nappe souterraine venant du coteau. Quelquefois cependant ce sont les eaux infiltrées de la rivière, plus ou moins bien épurées, que l'on recueille.

Mais lorsqu'on pompe plus d'eau que la nappe du coteau ne peut en fournir, on obtient en même temps de l'eau infiltrée de la rivière, mélangée à la première. A travers les alluvions suffisamment fines, l'épuration de ces dernières eaux est satisfaisante, il n'en sera pas de même pour les alluvions grossières.

Avant de les utiliser pour l'alimentation, il faut étudier de très près le pouvoir épurant de ces terrains.

Puits Lefort. — Ces puits furent établis dans la Loire, à l'île de Beaulieu et étaient destinés à l'alimentation de la ville de Nantes.

Ils étaient creusés dans le sable, avaient 2 mètres de diamètre et 7 mètres de profondeur.

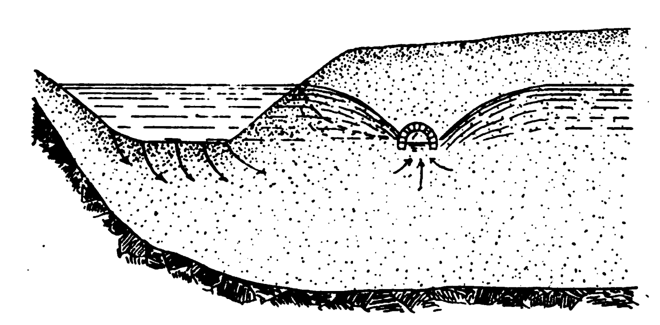


Fig. 95. — Captage par galerie.

Sur toute leur hauteur, on disposait des barbacanes pouvant s'ouvrir où se fermer à volonté.

Les résultats obtenus furent assez médiocres.

Capture des eaux profondes. — On peut difficilement, au moyen d'un puits, aller chercher les eaux d'une nappe profonde. Il faut faire un forage au moyen d'appareils de plus en plus perfectionnés et dont on trouvera les détails dans le *Guide du Sondeur* de MM. Degousée et Laurent. Au moyen de trépans spéciaux, on pratique des forages dont le diamètre atteint jusqu'à $1^{m},50$, c'est-à-dire égalant celui de véritables puits.

MM. Debauve et Imbeaux classent les méthodes de sondage de la façon suivante :

Méthodes de sondage.	a. Par percussion.	Avec tiges rigides et pleines.	en métal.	1. Méthode ordinaire.
			en bois.	2. Méthode canadienne.
		Avec tige non rigide.		3. Sondage à la corde.
		Avec tiges rigides mais creuses et par injection d'eau.		4. Procédé Fauvelle perfectionné par Raki.
	b. Par rotation..............			5. Sondage au diamant.

1° *La méthode ordinaire* au moyen d'une tige lourde en fer appelée *trépan* consiste à frapper le sol à coups répétés. Chaque fois on tourne légèrement le trépan de façon à dégager les morceaux de la roche que le choc a désagrégés et pour faire un sondage rond. On retire ceux-ci au moyen d'un autre instrument appelé *cuiller*.

2° *La méthode canadienne* ne se différencie guère de la précédente que par la constitution des tiges qui sont en bois au lieu d'être en métal.

3° *Le sondage à la corde.* — Était connu des Chinois depuis très longtemps ; on s'en sert beaucoup en Pensylvanie, pour forer les puits à pétrole. On ne le préconise guère que pour des profondeurs ne dépassant pas 200 mètres. Il a l'avantage d'être très rapide et de pouvoir être exécuté avec un appareil très rustique nécessitant très peu de personnel pour le manœuvrer. Malheureusement, il a aussi certains inconvénients.

Il est difficile de tourner facilement le trépan pour faire un sondage rond et dans les couches très inclinées, très souvent on n'arrive pas à le maintenir vertical.

Il est alors nécessaire de guider le trépan au moyen d'un tube conducteur. On peut aussi faire le battage à la corde et obtenir la rotation du trépan au moyen du tube conducteur.

Le procédé américain est un perfectionnement du sondage à la corde, grâce à l'emploi d'un tube métallique étanche qui évite les éboulis ou l'arrivée d'eaux latérales

et par l'emploi de la coulisse d'Œynhauser qui permet le dégagement facile du trépan.

Procédés Fauvelle et Raky. — Il est souvent très difficile d'éliminer rapidement les débris de roches qui s'accumulent au fond d'un forage. Ils arrivent à se tasser et à empêcher les effets du trépan.

C'est pourquoi Fauvelle a pensé utiliser l'eau pour chasser tous ces débris en la faisant arriver, sous une certaine pression, dans le fond du forage, par l'intermédiaire de la tige creuse qui surmonte le trépan.

Le procédé a été perfectionné par Raky qui est arrivé à faire un forage continu, tout en évitant les ruptures toujours si fréquentes de la tige.

Malheureusement on n'a pas toujours à sa disposition des grosses quantités d'eau à utiliser. Dans le cas de pénurie d'eau, ce procédé très rapide est inapplicable.

Procédé au diamant. — C'est un procédé qui utilise la rotation rapide d'un trépan en diamant, rotation combinée avec les injections continues d'eau comme dans le procédé Fauvelle.

Ce procédé est très rapide et permet d'atteindre de très grandes profondeurs.

Le sondage de Paruschowitz en Silésie, a pu, par ce procédé, être descendu à $2003^{m},34$ de profondeur.

Pour certaines roches relativement tendres, la couronne en diamant peut être remplacée par une couronne d'acier.

Forages et puits artésiens. — Historique (1). Les célèbres écrivains et historiens grecs, Polybe, né à Mégalopolis; Diodore d'Antioche, le philosophe Olympiodore, qui écrivit sur les *Météores* d'Aristote, le savant et éminent théologien Photius, rapportent que des puits creusés dans l'oasis, à des profondeurs variables de 200 à 500 coudées (100 à 250 mètres), lançaient par leurs orifices des rivières

(1) Partie empruntée complètement au livre de MM. Debauve et Imbeaux, lesquels l'avaient empruntée à M. G. Demetriadès.

dont les agriculteurs profitaient pour arroser les campagnes.

Selon le célèbre géographe grec Strabon, né en Cappadoce, il y avait trois oasis dans l'Égypte centrale qui constituaient de vastes terrains fertiles,

D'après un rapport sur les eaux artésiennes du Bas-Sahara algérien de M. Rolland, présenté le 10 juin au Congrès sur l'utilisation des eaux fluviales, à l'exposition universelle de 1889, on distingue plusieurs sortes d'oasis. Ce sont les oasis de rivière, les oasis à puits ordinaires, les oasis d'excavations, les oasis à sources naturelles et les oasis à puits jaillissants.

Les écrivains arabes Ilen Kaldoum (1332-1406), El Aïachi (1633), les voyageurs anglais Shaw (1692-1751) et Griffith, et l'allemand Niebuhr, racontent que les habitants du Sahara et d'Ouargla, ont fait jaillir de l'eau à la surface de la terre comme une rivière, en creusant des puits maçonnés à environ 50 ou 200 kama (82,5-330 mètres) de profondeur et jusqu'à la rencontre d'une pierre plate, que l'on a frappée avec un morceau de fer attaché à une poulie jusqu'à ce qu'elle se brise en livrant passage à l'eau. Les indigènes construisaient aussi des drainages souvent très longs appelés *foggare*.

Suivant le français M. Ayme (1860), les oasis de Thèbes et de Gharb étaient criblés d'anciens puits artésiens, nivelés en briques ou en bois, construits depuis près de 4000 ans, et qu'on a pu faire revivre en les désensablant : « j'ai nettoyé une fontaine à la profondeur de 325 pieds, qui me donne du poisson pour ma table », dit-il.

En ce qui concerne les petits poissons, les coquillages et les crabes, qui sortent vivants de plusieurs des puits artésiens du Sahara, M. Rolland fait venir ces êtres de Behour et Chria (eau dormante) voisins des forages, avec lesquels ceux-ci se mettent en communication par des voies profondes et souterraines. « Ces poissons sont des

cyprinodontes; les premiers qu'on recueillit l'ont été au puits de Tamerna, en 1858, c'est-à-dire deux ans après achèvement; alors, comme dit M. Jus, ingénieur, envoyé en 1856, par la maison française Degousée, pour prendre la direction des travaux de forage de l'Oued-Rio, le canal souterrain avait pu s'élargir et se dégager par l'entraînement du sable. Plus tard, à Nerbana, la nappe rencontrée à 72 mètres fournit beaucoup dès le jaillissement. De 1868 à 1872, on recueillit des poissons chromites, des coquillages et en 1878 des crabes. Le premier crabe fut fourni par le puits de Mazeretenite en 1875; il était de la grosseur du petit doigt et sa présence avait été parfaitement constatée à la sortie de la colonne d'ascension. On mit en doute son origine, et pour la démontrer on coiffa le haut du tube du forage d'un filet dans lequel on recueillit une quantité de crabes, de chromis, d'hémichromis et de coquilles. »

M. Lippmann pense qu'elles proviennent des hautes montagnes du Sud, du massif central de l'Ahaggar, dont le sommet s'élève à plus de 2500 mètres dans les régions des neiges d'hiver. M. Rolland rapporte que les eaux artésiennes du Bas-Sahara algérien et tunisien, viennent du Nord et descendent des massifs de l'Atlas. Leur alimentation s'opère de deux manières principales : par les eaux météoriques qu'absorbent les terrains dits l'atterrissement du Bas-Sahara, et par les eaux déjà artésiennes qui proviennent des terrains crétacés de l'Atlas.

M. Lippmann hésite à donner le nord comme origine à ces eaux, parce que les forages tentés au nord du Chott Melrir et poussés à de grandes profondeurs n'ont pas donné d'eau jaillissante; au contraire, jusqu'à présent, en descendant vers le nord, on en a toujours trouvé.

Suivant M. P. Debette, ingénieur des mines, les Chinois connaissent les fontaines jaillissantes depuis des milliers d'années.

Si l'on peut dire que les puits jaillissants remontent à

l'époque de Moïse, nos connaissances sur les méthodes de calcul de ces puits sont beaucoup plus récentes.

La théorie et les idées du philosophe grec Aristote (né à Stagire et mort à Chalcis en Eubée, 384-322 av. J.-C.) et de ses disciples, sur l'origine de l'eau des sources et des fontaines, ont joué un rôle important jusqu'au XVII[e] siècle, alors que les progrès de l'art moderne du sondeur permirent d'expliquer dans ses moindres détails le phénomène des eaux jaillissantes ».

Le premier puits artésien, foré en France, fut celui de l'ancien couvent des Chartreux, à Lillers, dans le Pas-de-Calais et il date de l'année 1126. Depuis, dans toute cette région, on a creusé un certain nombre d'autres puits artésiens, la plupart dans la craie.

Le premier puits artésien de Paris fut commencé en 1833 et fini en 1841, il atteignit les sables verts.

La géologie est nécessaire pour soupçonner et expliquer la présence d'eaux artésiennes. Elle ne donne guère que des probabilités, parce qu'il lui est impossible de prévoir les frottements que les eaux souterraines éprouvent dans le sol, frottements qui peuvent aller jusqu'à empêcher leur jaillissement.

Forage des puits artésiens. — MM. Kuss et Fure, dans leur traité de l'exploitation des mines, citent les règles nécessaires à l'établissement d'un puits artésien.

« 1° Le niveau piézométrique en un point donné, c'est-à-dire le niveau statique auquel se tient l'eau dans le puits supposé prolongé par un tube d'une longueur suffisante pour que l'écoulement n'ait pas lieu, est indépendant du diamètre.

« 2° Le débit d'un puits artésien augmente avec le diamètre, mais dans un rapport moindre que celui des sections et d'ailleurs impossible à calculer à l'avance.

« 3° Le débit augmente également à mesure que l'on abaisse l'orifice d'écoulement, mais sans que l'on puisse non plus calculer cette augmentation.

« 4° Le niveau piézométrique ainsi que le débit s'élèvent quand on vient à tuber un puits qui ne l'était pas.

« 5° Deux puits voisins s'influencent, et chacun d'eux ne donne qu'une partie du débit qu'il aurait s'il était seul. La somme de leurs débits tend, à mesure qu'ils sont plus rapprochés, à se réduire à ce que fournirait un puits unique ayant une section égale à la somme de leurs sections.

« 6° Le débit des puits voisins de la mer peut varier selon le cours des marées, la nappe ayant généralement son débouché sur la mer. »

Une fois le tube du forage introduit dans le puits artésien, il est quelquefois nécessaire d'empêcher absolument les eaux supérieures de se mélanger avec celles plus profondes qu'on désire capter. Pour faire cette séparation on emploie souvent deux tubes. Le premier tube est introduit jusqu'à la première nappe. On verse dans le fond une couche de mortier de ciment et avant que sa prise soit complète on introduit un tube de diamètre inférieur au premier. Du ciment est coulé entre ces deux tubes pour assurer l'étanchéité même du forage jusqu'au-dessous de cette première nappe artésienne (fig. 96 et 97).

Dans le cas où un seul tube est employé, on fore jusqu'à la nappe dont les eaux doivent être écartées. On obture la partie inférieure au moyen d'un bouchon de ciment et le tube est enfoncé à travers ce bouchon jusqu'à la rencontre de la nappe à capter. On introduit aussi à l'extérieur du tube, au-dessous de la première nappe, un bouchon au ciment qui permet de séparer les deux nappes (fig. 98).

M. T. C. Chamberlin signale comme principales causes de la diminution progressive du débit des puits artésiens :

1° La diminution de la pression des gaz qui, surtout dans les régions du pétrole et du gaz naturel, agissent sur la nappe.

2° La diminution de la charge résultant des épuise-

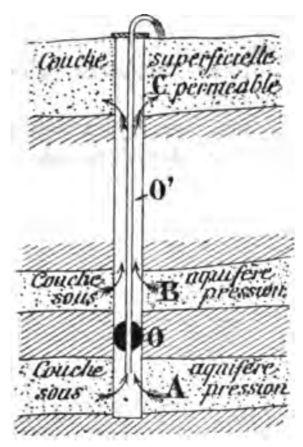


Fig. 96. — Captage d'une nappe artésienne profonde (d'après MM. Debauve et Imbeaux).

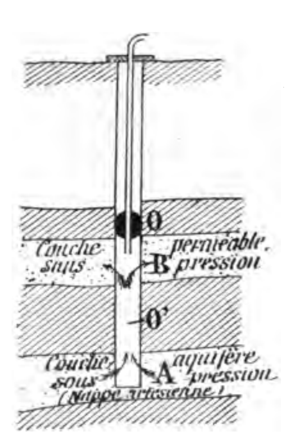


Fig. 97. — Mauvais captage d'une eau artésienne profonde. Les eaux viennent se perdre dans une partie perméable et ne peuvent remonter à la surface du sol (d'après MM. Debauve et Imbeaux).

ments et du fait que l'équilibre étant rompu entre les apports et l'écoulement souterrain, le niveau de la nappe

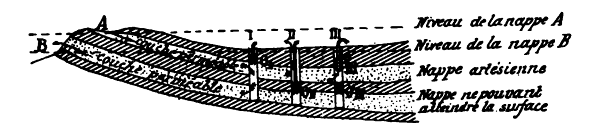


Fig. 98. — Exemple de trois puits artésiens I et II mauvais, III réussi. La nappe A peut seule remonter jusqu'à la surface. Le puits I permet aux eaux de A de s'écouler par B, le puits II ne permet pas aux eaux de A de passer par le tube, seul le puits III, grâce à l'obturation O''', permet le jaillissement par le tube (tirée du livre de MM. Debauve et Imbeaux).

aux affleurements doit s'abaisser et suivre davantage les variations de la pluie.

3° L'augmentation des fuites ;

4° L'obstruction de l'orifice ;

5° Le défaut du tubage.

D'après M. Dollfus les différents forages artésiens qu'on trouve dans le bassin de la Seine sont :

1° Le forage de Sotteville-les-Rouen, dans le jurassique ;

2° Le forage du Pont-de-l'Arche, dans les sables

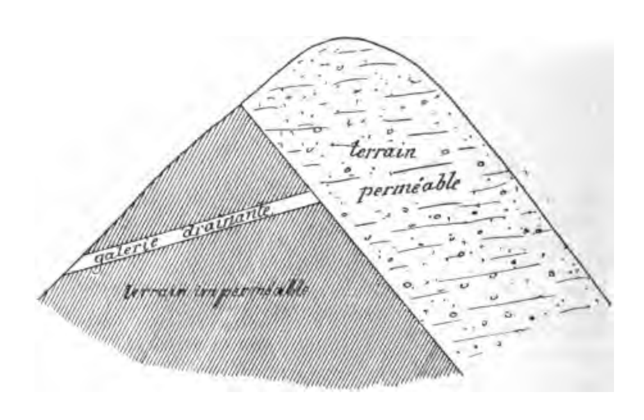


Fig. 99.

aptiens. Ces deux eaux sont très fortement minéralisées ;

3° Le forage de Pressagny-l'Orgueilleux, dans les sables albiens ;

4° Les deux forages de Vernon l'un des sables albiens et l'autre dans les sables aptiens ;

5° Le forage de Rosny-sur-Seine, dans les sables albiens ;

6° Le forage de Carrières-sous-Poissy, également dans les sables albiens ;

7° Les forages de Barre-en-Ouche (Eure).

Galeries drainantes. — On peut obtenir de véritables sources artificielles au moyens de galeries. Consi-

dérons une couche argileuse placée sous une couche perméable (fig. 99) dont l'inclinaison est très forte. La partie gauche de la figure est dépourvue d'eau, tandis que la partie droite, au contraire, est très aquifère. Creusons une galerie à travers la couche imperméable jusqu'à sa rencontre avec la nappe perméable. Elle créera une source artificielle permettant à une partie des eaux du versant de droite de se déverser sur le versant de gauche.

Ce procédé a le grave inconvénient de coûter fort cher et d'être peu à la portée du budget d'une exploitation.

Comme galeries drainantes existantes, il faut citer celles de Liège dans la craie, de Bruxelles dans les sables de l'Yprésien, d'Aix-la-Chapelle et de Nancy. Cette dernière ville a, sous la direction de MM. Imbeaux et Villain, capté les eaux du Bajocien, constituant le plateau de la forêt de Haye au moyen d'une galerie normale à la direction des couches et creusée dans les marnes étanches du Lias. Ces eaux, issues de forêts, sont pures.

III

FORAGE DES PUITS A LA DYNAMITE

Dans notre deuxième partie nous avons indiqué les puits susceptibles, très souvent, de donner beaucoup d'eau. Toutefois nous avons eu bien soin d'ajouter qu'en creusant un puits ordinaire dans ces parages, on avait beaucoup de chance de ne pas tomber directement sur une diaclase importante. A cet inconvénient il est remédié en faisant, à partir du fond du puits, des galeries captantes, perpendiculaires à la direction générale de l'écoulement des eaux souterraines. Ce procédé n'est pas dépourvu de dangers pour le puisatier et il est préférable d'opérer autrement.

A cette occasion nous avons déjà préconisé le système

de M. P. Chalon par l'emploi des explosifs. Voici ce que dit cet ingénieur à ce sujet (page 133) :

« On emploie les procédés ordinaires de fonçage en s'aidant de la poudre ou de la dynamite, et forant les trous de mine au fleuret et à la massette.

Dans la plupart des cas, les parois ne demanderont aucun revêtement en maçonnerie de chaux ou de ciment, ce qu'il faut d'ailleurs éviter le plus possible car les calcaires, craies, grès et certains granits débitent de l'eau par leurs fentes et fissures.

Pour le travail de mine, on évitera tous accidents en calculant convenablement les charges de poudre ou d'explosif. Et dans ce but, on peut se servir de la formule que j'ai indiquée en 1894 et qui paraît donner satisfaction.

Cette formule est la suivante : $P = ER\,(at)^2$.

P. charge d'explosif en kilogramme.

E. coefficient proportionnel à la quantité d'explosif pouvant produire le même effet que 1 kilogramme de dynamite n° 1. R coefficient proportionnel à la résistance de la roche.

t. profondeur du trou de mine.

at. ligne de moindre résistance en fonction de t. Cette ligne varie entre 0,50 t et t. Elle est mésurée à partir du centre de charge.

Tableau des valeurs de E.

Gomme extra-forte à.......	92 p. 100	0,70
— potasse............	83 —	0,80
Gélatine IA à la soude......	64 —	0,87
— IB à la potasse	57,5 —	0,97
Dynamite n° 1 à la guhr...	75 —	1,00
— n° 3............	22 —	1,30
Grisoutine G...............	30 —	1,57
— B...............	12 —	2,00
Fulmicoton		0,95
Roburite, bellite..........................		1,22
Rackawckon poudre chloratée		1,30

Dynamite ammoniacale (30 p. 100 dyn.).	1,35
N° 3	1,80
Poudre de mine noire comprimée......	2,00
— — — granulée........	2,50

Tableau des valeurs de R.

Roches très dures : quartz, etc., granite dur..................................	1,00
Roches dures : granite, porphyre, gneiss.	0,80
— — : schistes durs, calcaire cristallin............................	0,50
Roches moyennement dures : calcaires, schistes............................	0,30
Roches tendres : houille, craie, schiste, facile	0,15

La valeur de P est réduite de 50 à 75 p. 100 lorsque l'on opère sur un front de taille bien dégagé ou sur un bloc partiellement dégagé.

Pour de simples pétards on prend de 30 à 35 p. 100 de P.

Premier exemple. — Forage à la poudre comprimée dans un grès fissuré.

Diamètre des trous de mine, 40 à 50 millimètres.

Tableau n° 2.

On prendra : R = 0,40 E = 2 at = 0,66 t.

Pour t = 1,50 m.,	on trouve :	P = 0,800 kg.
t = 2,00 —	—	P = 1,400 —
t = 2,50 —	—	P = 2,200 —

Si on opère sur un bloc bien dégagé sur deux faces, on ne prend que 75 de P. et 50 seulement s'il y a un plus grand nombre de faces libres.

Deuxième exemple. — Forage à la dynamite n° 1 dans le granit.

Diamètre de trous mine, 18 à 30 millimètres.

Tableau n° 3.

On prendra : R 0,70 E = 1 at = 0,50 t.

Pour t = 1,00 m.,	on trouve :	P = 0,175 kg.
t = 1,50 —	—	P = 1,400 —
t = 2,00 —	—	P = 0,700 —
t = 2,50 —	—	P = 1,100 —

Ces valeurs de P peuvent être réduites de 20 à 30 p. 100 selon que le bloc est sur un plus ou moins grand nombre de faces.

En raison des fissures que présentent les roches diaclasiques, les trous de mine perforés dans ces roches rencontrent fréquemment des fentes dont la présence cause particulièrement avec les poudres lentes, comme la poudre noire ordinaire, de longs feux, de véritables ratés. Il faudra, dans un cas de ce genre, procéder par petits coups de mine, en bourrant aussi énergiquement que possible avec des tampons d'argile molle. »

La charge employée pour arriver à créer des fissures aquifères dans un puits varie de 500 grammes à 2^{kg},800 de dynamite gomme, qu'on fait éclater en de nombreuses explosions de 50 à 100 grammes chaque fois.

Quand on opère sous l'eau on n'est pas obligé de bourrer la dynamite. L'eau suffit surtout dans les forages, pour former bourre.

Il faut seulement se méfier que le tube du forage ne soit soulevé trop haut au-dessus du sol au moment de l'explosion. On doit prendre également toutes les précautions d'usage après chaque explosion, et de la sorte on évite tout accident.

IV

RENFORCEMENT DES NAPPES. CAPTAGE DE CES EAUX

Renforcer une nappe, c'est augmenter la proportion des eaux infiltrées. Celles-ci peuvent cheminer ou horizontalement ou verticalement. Dans un chapitre précédent nous avons vu les eaux qu'on récoltait en pompant plus ou moins dans les alluvions. On dispose de différents moyens pour augmenter beaucoup la proportion des eaux de rivières pompées dans ces terrains.

Procédé horizontal. — A Schweinfürt sur le Mein on

a pu, par infiltration de la rivière, augmenter la nappe souterraine. Sur ce cours d'eau on a construit un barrage *A B* (fig. 100) de façon à élever le niveau de l'eau de la rivière, ce qui a pour effet d'augmenter la charge sur les berges. De cette façon une grande partie du courant passe à travers les sables. On a pratiqué une série de puits aboutissant chacune à un même collecteur puis à un même puisard. L'eau pompée était composée pour

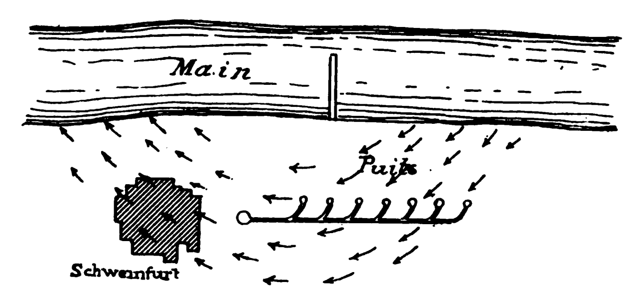


Fig. 100. — Renforcement de la nappe de Schweinfürt (d'après Richert).

une petite partie d'eau de la nappe et pour une grosse partie d'eau infiltrée du Mein.

Le barrage employé a Schweinfürt est vieux de plusieurs siècles et le lit de la rivière n'est pas devenu imperméable. La vase qui aurait pu colmater les pores des alluvions filtrantes avait été entraînée par le courant et n'avait plus d'influence néfaste sur le filtrage. Richert, qui donne ces renseignements, dit, en parlant de Schweinfürt, que la capacité de la rivière à tenir le lit pur peut être considérée comme démontrée.

Au contraire, partout où la rapidité du courant est insuffisante pour empêcher le colmatage du lit, le renforcement horizontal des nappes échoue. La *Kaiser Ferdinand Leitung*, construite par l'empereur Ferdinand I[er] à Vienne, est un exemple où, au bout de peu de temps, le

lit de la rivière s'est colmaté et n'a plus fourni la quantité d'eau sur laquelle on comptait. On a dû l'abandonner.

A Toulouse on emploie encore des eaux infiltrées de la Garonne à travers les alluvions pour l'alimentation de la ville. Le curage des rivières s'impose dans ces installations.

Pour curer la rivière, on enlève de temps en temps le barrage. On provoque ainsi une augmentation brusque de la vitesse de l'eau et l'entraînement des dépôts qui pourraient gêner l'infiltration.

En s'infiltrant, les eaux des rivières subissent, en été, un refroidissement très recherché.

Au point de vue de la qualité, ces eaux ne sont peut-être pas toujours à recommander. Par exemple, à Toulouse on se plaint de leur richesse en bactéries. A Lyon les eaux du Rhône déjà très pures à leur entrée dans les alluvions, le sont également à leur sortie. Dans chaque cas particulier une étude s'impose avant de décider si ces eaux sont potables.

Ce procédé est surtout pratique quand, ne disposant en abondance que d'eaux superficielles chaudes, on désire, comme en laiterie, avoir des eaux fraîches en été.

Procédé vertical. — La filtration verticale est au contraire celle qui, au point de vue de la qualité, permet d'obtenir des eaux excellentes; les frais de relèvement d'eau en font un procédé coûteux. Voici ce que dit M. Richert, spécialiste en cette matière (1) :

« Il peut arriver par contre que, quoique le district d'infiltration soit insuffisant et la nappe souterraine insignifiante, les conditions souterraines soient favorables en elles-mêmes. Dans plus d'une vallée, on rencontre, sous la couverture d'argile, un lit profond de sable stratifié ou même de gros gravier. Le résultat de l'exploration hydrologique sera, il est vrai, négatif en ceci que la

(1) Richert, *Les eaux souterraines artificielles.*

nappe souterraine est insuffisante par suite de l'absence d'infiltration, mais il a été démontré à la même fois que dans des conditions favorables d'infiltration l'eau souterraine serait en état de fournir un afflux d'eau bien des fois plus grand. Loin de perdre courage, il faudra, dans ce cas, plutôt raisonner comme suit : La quantité de l'infiltration étant seule insuffisante, que l'ingénieur vienne en aide à la nature en établissant une infiltration artificielle.

« Si, par exemple, le lit de filtrage souterrain n'affleure que sur un point de la grandeur d'un hectare, il ne s'y infiltre annuellement qu'une quantité de pluie de 3 000 mètres cubes au maximum, tandis que la surface du sable serait à même de laisser pénétrer, sans la moindre difficulté, une quantité *quotidienne* au moins tout aussi grande. Or, si le terrain sous-jacent est en état de laisser passer dans le sens horizontal un courant existant de la même capacité, le problème devra pouvoir se résoudre sans la moindre peine en dirigeant, du cours d'eau le plus rapproché, 3 000 mètres cubes d'eau par jour, à la surface de sable mentionnée pour y être infiltrés et transformés en eau souterraine.

« Le principe est ancien, mais n'a été appliqué jusqu'ici que sur une très petite échelle et dans des conditions peu favorables. A *Wiesbaden* et à *Runscheid*, on a conduit de l'eau de ruisseau dans les fossés du filtreur. A *Chemnitz*, les eaux bourbeuses de la Livonitz sont dirigées en partie dans un *canal de filtrage* dont le fond descend dans une couche de gravier aquifère, et en partie dans une prairie herbeuse que l'on irrigue à des intervalles déterminés suivant le système bien connu d'*irrigation* pour la purification des eaux d'égout. Dans la saison d'hiver, où l'irrigation est impossible, on ne se sert que des canaux de filtrage. Malheureusement, le lit de gravier a trop peu de puissance pour pouvoir débiter dans le sens horizontal une quantité d'eau relativement grande, et

l'infiltration doit, par conséquent, se faire au voisinage presque immédiat des puits d'où l'eau est captée avant sa transformation et son amendement au degré désirable.

« En 1888, M. Thiem présente un projet de conduite d'eau pour la ville de Stralsund, basé sur la « fabrication » effective d'une nappe d'eau souterraine. D'un lac voisin, il devait être conduit, par la gravitation, une quantité journalière d'eau de 5 000 mètres cubes à 56 bassins d'irrigation du total de 3.6 hectares. »

Le projet de Thiem fut repoussé parce qu'on craignait que l'eau ne disparût dans les sables. On ne peut, en effet, décider la création d'un tel système de renforcement de la nappe, sans connaître l'étanchéité de la couche imperméable.

« En Suède, où les conditions défavorables de l'infiltration naturelle exigent plus qu'ailleurs l'augmentation artificielle des eaux souterraines, la méthode d'irrigation est moins convenable que dans les pays à climat plus doux, quoiqu'elle puisse naturellement toujours être utilisée dans les parties de l'année où le sol n'est pas gelé. Le filtrage naturel ordinaire par le lit du courant ne peut être employé qu'à titre exceptionnel, nos rivières coulant, en général, sur la roche, le gravier de moraine ou l'argile.

« Le système convenant le mieux à nos conditions est celui d'un *bassin d'infiltration* curable, c'est-à dire d'un bassin creusé dans le sol avec une profondeur d'eau suffisante pour empêcher la congélation de la surface du sable, et avec des dimensions permettant de réduire les curages à un très petit nombre par année. La figure schématique suivante sert d'illustration à ce principe (fig. 101).

« Le fond du bassin, placé, si possible, plus haut que le niveau de l'eau souterraine, est recouvert d'un sable de filtrage fin et homogène. La première eau introduite percole librement à travers le fond, mais bientôt l'aug-

mentation de l'eau souterraine provoque l'élévation de son niveau, et il se produit un filtrage continu. Par suite de l'augmentation continue du dépôt de vase, la résistance à l'infiltration croît successivement, et l'eau du bassin s'élève de plus en plus au-dessous de la nappe souterraine environnante.

« Quand cette différence de hauteur *m* sur la figure a atteint un certain maximum, un mètre par exemple, le temps est venu de curer le bassin. On arrête l'afflux, et la surface de la nappe tombe sous celle du sable que l'on enlève parfaitement de la même manière que dans un filtre artificiel ordinaire; cela fait, on introduit l'eau et

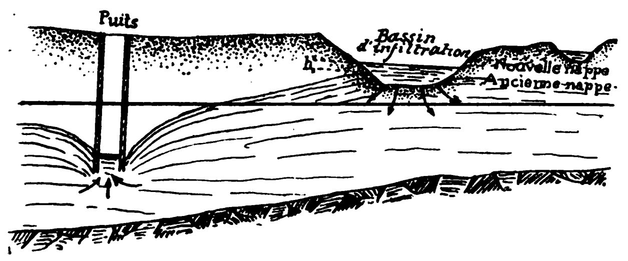


Fig. 101.

le bassin entre de rechef en activité. Pendant le court espace de temps nécessaire pour le curage, la diminution de la quantité d'eau souterraine est compensée par la réserve d'eau qui se trouve entre le bassin et le puits.

« La condition principale d'un bon résultat est de trouver la juste distance entre le bassin et le puits. La purification mécanique de l'eau, y comprise la séparation des microbes, s'opère déjà lors de l'infiltration et dans la couche supérieure du sable. L'égalisation de la température et les modifications chimiques exigent par contre un certain temps, c'est-à-dire une certaine distance entre le bassin et le puits, et plus est long le chemin que l'eau

doit parcourir, plus augmente en puissance et en qualité le réservoir souterrain dont l'emmagasinage d'eau peut être utilisé lors du curage du bassin ou dans une augmentation passagère de la quantité élevée. »

Depuis plusieurs années, la ville de Gothembourg a été obligée, pour se procurer de l'eau, de renforcer artificiellement une nappe souterraine.

Cette installation, faite par Reichert, est décrite ainsi par lui :

« Gothembourg est situé sur le fleuve le « Göta-Elf »

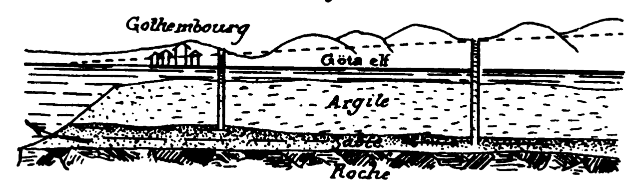


Fig. 102. — Coupe géologique de la région de Gothembourg.

à quelques kilomètres de son embouchure dans le Kattegatt. La vallée court entre des chaînes de rochers fortement dessinées, et le lit du fleuve est formé par de l'argile bleue (argile glaciaire). Des monticules de sable épars, s'élevant au-dessus du sol, faisaient néanmoins supposer que l'argile repose sur le sable, et, en 1890, il fut procédé, sur les conseils de l'ingénieur Salbach, à l'exploration hydrologique complète de cette vallée et de ses voisines. On constata l'existence d'un courant souterrain artésien sous le lit du Göta-Elf (fig. 102).

« Il ne fut pas fait de calcul quantitatif par la raison que l'eau souterraine fut constatée contenir jusqu'à 200 milligrammes de chlore par litre et 4 d'ammoniaque.

Salbach et d'autres experts l'estimaient impotable. Il fut construit deux bassins d'infiltration couverts pour la purification de l'eau du Göta-Elf et dans le plan d'extension pour l'avenir le plus rapproché entrèrent quatre bassins nouveaux d'une capacité journalière de 11 500 mètres cubes.

« En 1895, cependant, la question de l'eau souterraine fut soumise à un nouvel examen. Les opinions sur la qualité d'une bonne eau de conduite avaient subi des modifications considérables, et l'on ne redoutait plus la présence du chlore et de l'ammoniaque dans une eau aussi profonde que celle-là.

« De nouvelles explorations donnèrent toutefois pour résultat que les eaux souterrains naturelles ne fournissaient que 2000 mètres cubes par vingt-quatre heures, par conséquent une fraction insignifiante de la quantité requise.

« Au lieu d'abandonner toute espérance, on passa à des essais d'augmentation, par la voie artificielle, de la capacité de l'eau souterraine. Dans une sablière s'élevant au-dessus de l'argile, où l'eau souterraine libre était au niveau de la hauteur artésienne sur les rives du fleuve, à 5 mètres au-dessus du niveau, l'eau fut conduite sans interruption pendant plusieurs mois, et, en présence des résultats favorables obtenus, il fut élaboré un projet de fabrication d'eau souterraine artificielle qui est en activité depuis l'automne 1898.

« Le total de la surface du sable des bassins d'infiltration comporte environ 5 000 mètres carrés. Le fond en est à $0^m,5$ au-dessous de la surface de l'eau souterraine naturelle, soit à + 4,5 et la surface de l'eau à + 6,5 en communication libre avec les anciens bassins de filtrage au voisinage des pompes.

« A 200 mètres en aval des bassins, l'eau est recueillie par 20 puits tubulaires, et se rend par gravitation à un puits d'élévation situé près de la maison des machines.

Le niveau de l'eau souterraine est en moyenne de + 3,5 entre les puits et de + 4,5 dans un puits d'observation creusé près de la maison des pompes.

« Ainsi la nappe naturelle au-dessous du complexe de puits a diminué de 0^{m},5 ou de 10 p. 100.

« Or, l'affluence d'eau souterraine naturelle, 2 000 mètres cubes par vingt-quatre heures, correspondant à une pression de hauteur de 5 mètres, une diminution de pression de 10 p. 100, ne représente qu'une perte de 200 mètres cubes, chiffre qui peut être totalement négligé. Chaque goutte de l'eau infiltrée est ainsi captée par les puits.

« La différence de niveau en dedans et en dehors des bassins s'élève, au commencement de la campagne de filtrage, à 0,15 et augmente à 0,7, — 1,0 m. pendant le cours de deux à trois mois, après quoi les bassins sont fermés, vidés et curés.

« La capacité journalière actuelle du complexe de puits n'est que de 6 500 mètres cubes, correspondant à une vitesse d'infiltration de 1,3 m. Afin de pouvoir obtenir plus tard les 11 500 mètres nécessaires, il faudra, ou établir de nouveaux puits, ou agrandir la capacité des puits actuels par l'abaissement plus considérable du niveau de l'eau.

« Au point de vue de la qualité, les résultats ne laissent rien à désirer. L'eau a la clarté du cristal et elle est aussi fraîche que la meilleure eau de source naturelle. La teneur en chlore, qui s'élève à 200 milligrammes, au milieu du courant du fleuve, n'est plus que de 90 milligrammes dans les puits et celle d'ammoniaque n'a jamais dépassé 0,6 milligrammes. La température varie entre + 8,C en été et 10 C en hiver, et dans environ la moitié de plus de 100 échantillons d'eau analysés, le nombre des microbes a été de 0, preuve que l'eau est totalement stérile.

« Ici le filtrage naturel a donc suffi à transformer une eau fluviale fréquemment impure et vaseuse en une eau de source de la meilleure qualité. »

Si en Suède on s'est beaucoup occupé du renforcement des nappes souterraines, la question en France a également été abordée, du moins en théorie, par M. Trélat d'une part, par M. Janet d'autre part.

En 1889, M. Trélat a émis à l'Association pour l'avancement des sciences, l'avis qu'on pourrait utiliser les sables de Fontainebleau qui environnent Paris pour obtenir de l'eau pure.

Il suffirait d'y envoyer des eaux de la Seine et de récolter celles-ci au bas des sables.

Le procédé, parfait en théorie, se heurte dans la pratique à de très graves impossibilités. En effet, la principale réside en ce que dans la forêt de Fontainebleau, les sables ne reposent pas sur une couche imperméable, uniforme et régulière. Les marnes à huîtres et les glaises vertes qui constituent ce fond imperméable ne forment que des lentilles de petite étendue. Les sables reposent souvent directement sur les calcaires de Brie et les calcaires inférieurs du Saint-Ouen perméables.

A moins de descendre très profondément, sur la couche souvent très irrégulière également des argiles plastiques, on risquerait de perdre un très gros volume des eaux répandues à la surface du sol.

La forêt de Fontainebleau ne peut donc pas servir pour la purification des eaux de Seine, il faut choisir autre part une butte sableuse reposant immédiatement sur une couche argileuse imperméable.

A cet effet, M. Janet a pensé devoir préconiser la butte de Montmorency, voisine de la rivière de l'Oise, formée de sables de Fontainebleau, ayant une épaisseur de 60 mètres, reposant directement sur la couche des marnes à huîtres, imperméable (fig. 103).

Dans ce projet on creusait à la surface de cette butte une série de puits absorbants, de quelques mètres de profondeur, qui devaient recevoir l'eau pompée dans l'Oise. Celle-ci était récoltée à la base de la butte par des gale-

ries considérables et difficiles à établir parce qu'on est dans les sables.

Pour empêcher l'encrassement qui pourrait nuire au bon fonctionnement des puits, on prévoyait des curages de temps à autre.

Ce projet, très intéressant, n'a pu être accepté à cause du prix élevé de la première expérience et de la difficulté devant laquelle on se trouvait pour capter cette eau.

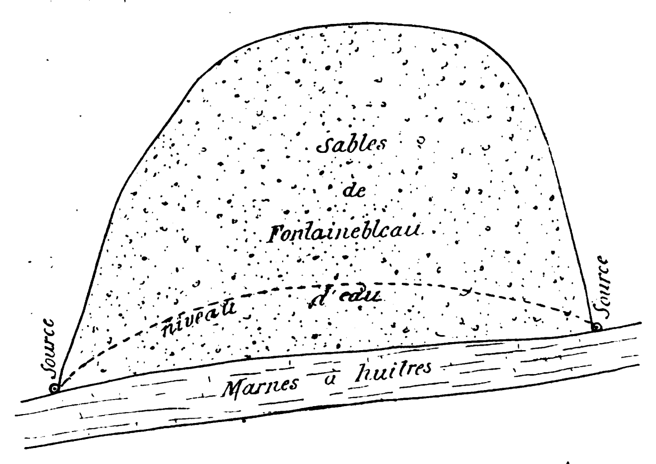


Fig. 103. — Coupe géologique de la forêt de Montmorency.

Par ce procédé M. Janet estimait que pour une surface de 300 hectares, on obtiendrait 5 mètres cubes d'eau excessivement pure à la seconde en faisant infiltrer par les puits une hauteur d'eau annuelle de 8 mètres.

On réalisait ainsi une filtration, à travers un sable non saturé d'eau, c'est-à-dire dans les meilleures conditions pour obtenir une eau essentiellement débarrassée de microbes. Depuis l'époque où M. Janet a proposé ce moyen, différentes études que nous allons retrouver par la suite ont montré qu'on devait obtenir

par ce moyen des eaux d'une très grande pureté.

Si on ne peut obtenir des eaux potables ou industrielles par un de ces moyens naturels, il faut épurer et améliorer artificiellement ces eaux superficielles ou souterraines qu'on a à sa disposition.

Tous ces procédés demandent qu'on élève l'eau à une certaine hauteur. Dans certains cas, comme celui de la figure 104, en faisant un puits absorbant en B, on obtient un moyen très économique de renforcer la nappe en A.

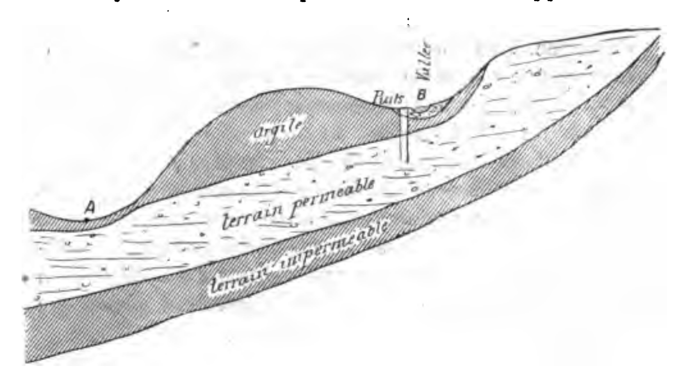


Fig. 104. — Renforcement d'une nappe par les eaux d'une vallée supérieure.

En B est une rivière et entre A et B, de l'argile reposant sur une couche de sable ou d'un terrain perméable quelconque. D'après ce que l'on sait, A recevra en abondance des eaux de ruissellement et, pour aller trouver des eaux souterraines, il faudra creuser des puits. Si la surface d'affleurement du terrain perméable est faible, la nappe rencontrée sera peu abondante. On voit bien, sur cette figure, l'acheminement souterrain des eaux absorbées en B et le renforcement de la nappe en A. C'est le seul procédé économique. Celui qui consiste à percer le massif d'argile pour amener les eaux de B en A, au moyen de tuyaux, est très dispendieux. Il est loin de fournir des

eaux aussi fraîches et de bonne qualité que le premier procédé.

Captage rationnel en certains points d'un périmètre. — Nous avons vu précédemment que les eaux souterraines peuvent descendre d'un gisement géologique supérieur dans un autre inférieur, toutes les fois que la couche imperméable, qui les sépare, présente des solutions de continuité. L'étude rationnelle d'un périmètre est donc utile, car elle permet de rechercher les points de la couche imperméable par où une partie des eaux s'échappe. Une fois ces points connus, par un moyen économique comme les moulins à vent, ou par tout autre procédé, on cherchera à remonter ces eaux à la surface du sol, un peu à l'amont du point où elles se perdent plus profondément dans le sol. Ce procédé a d'abord l'avantage de faire bénéficier de cette eau une partie des habitants de la région, mais aussi retarde beaucoup le creusement des diaclases du gisement géologique inférieur qui tendent à absorber un volume d'eau de plus en plus considérable et à assécher le gisement géologique supérieur.

CINQUIÈME PARTIE

STÉRILISATION ET AMÉLIORATION DES EAUX POTABLES. ÉPURATION DES EAUX USÉES.

I

GÉNÉRALITÉS

En étudiant la qualité des eaux, nous avons eu l'occasion de montrer qu'il y a des cas où celles-ci doivent être stérilisées avant d'être consommées. L'action de la nature est souvent incomplète. L'homme s'est alors efforcé, en copiant celle-ci, d'augmenter artificiellement l'intensité d'action des procédés naturels d'épuration et de stérilisation des eaux dont nous avons parlé précédemment. Prenons un exemple. Un sol est-il insuffisamment filtrant? On fera passer l'eau, captée dans ces terrains, sur un filtre composé de grains de sable uniforme et bien filtrant, comme dans le filtre de M Miquel que nous verrons par la suite.

Au lieu de filtrer les eaux, on les traitera par un oxydant énergique comme l'ozone, le peroxyde de chlore, l'eau oxygénée. On obtient ainsi plus rapidement et plus complètement le même effet stérilisant qu'avec la lumière.

Il est évident que la nature ne semble pas tenir à faire une œuvre complète de destruction. Elle a pour effet de régulariser le développement des différents organismes, de façon que chacun vive et accomplisse sa fonction sans trop se nuire entre eux. Les microbes,

tout au moins certains, qui, pour nous, sont des êtres nuisibles, accomplissent certains phénomènes de destruction qui sont nécessaires au maintien de la vie des organismes vivants. S'il n'y avait pas d'organismes de la putréfaction, que deviendrait la matière organique accumulée dans les organismes morts? De la matière inerte, perdue pour toujours et, à la longue, la vie s'arrêterait faute d'aliment.

La nature, assurant la continuation de la vie de tous les êtres, ne peut favoriser l'un sans nuire à l'autre. L'agriculteur en fait très souvent la triste expérience. Toutes les fois que, artificiellement, il augmente trop vite ses récoltes, il ne tarde pas à voir arriver des insectes ou des maladies qui lui disputeront le succès de ses efforts. C'est la lutte perpétuelle des différents êtres, nécessaire pour la bonne harmonie de la vie terrestre.

Ceci explique pourquoi souvent, en cherchant à combattre jusqu'à l'extinction une maladie, on en développe une autre. Peut-être l'homme arriverait-il à son but, si ses efforts n'étaient que progressifs, et s'il se contentait de victoires successives mais lentes sur les germes qui l'accablent! Généralement, il cherche à obtenir très rapidement un résultat parfait. Il n'arrive qu'à détruire l'harmonie des conditions qui président au développement de son être.

Loin de nous la pensée de considérer que l'hygiène est inutile. Les résultats, obtenus à la suite d'une amélioration de la qualité des eaux d'alimentation, sont là pour attester de son utilité.

Mais la question qui se pose est la suivante : Doit-on exagérer à l'excès les conditions naturelles de l'épuration des eaux? Est-il bien démontré qu'il soit avantageux de ne boire que des eaux sans microbe?

On a essayé de prouver que la vie, sans microbes, était possible.

Différents expérimentateurs ont, à ce sujet, fait une série d'expériences très intéressantes, qui semblent bien montrer qu'on peut, dans des conditions spéciales, obtenir le développement d'êtres vivants à l'abri de tous microbes. Cette vie a été relativement courte parce qu'il est très difficile de maintenir un organisme vivant hors de toute contamination. Rien ne dit que ces organismes, croissant plus longtemps à l'abri des microbes, eussent prospéré aussi longtemps et aussi vigoureusement que les êtres ordinaires. Mais quand un animal a vécu avec une association microbienne, il est très dangereux d'essayer de lui supprimer tout germe. C'est ce que MM. Charrin et Le Play ont essayé de prouver en expérimentant sur des lapins.

M. Metchnikoff, dans un article récent, fait quelques réserves, sur l'extension à l'homme des résultats obtenus par MM. Charrin et Le Play sur les lapins. Ce savant avance que les meilleures bactéries intestinales sont les ferments lactiques. Mais jusqu'ici, on n'a jamais trouvé d'intestin humain exempt de *B. coli communis*. Sa présence n'indique nullement son utilité, il est vrai, mais en l'absence de toute expérience démontrant le contraire, on peut se demander, à la suite des expériences de MM. Charrin et Le Play, si ce germe ne contribue pas pour une certaine part, à la digestion des matières hydrocarbonées et albuminoïdes.

L'eau apporte avec elle un certain contingent de microbes. Les aliments, et en particulier tout ce qu'on mange à l'état cru, en fournissent également une certaine part. La viande aussi n'en est pas exempte, quelques-uns même sont des plus dangereux, et provoquent, quelquefois, des cas d'empoisonnement graves. C'est pourquoi, rationnellement, on doit chercher à éliminer des eaux les germes dangereux, jeunes et virulents, absolument nuisibles aux organismes qui les absorbent. La surveillance des eaux de Paris est basée sur ce

principe (1). On cherche à éliminer de la surface du sol tous les germes jeunes et virulents qui proviennent des malades typhiques, cholériques, dysentériques, etc. avant leur arrivée possible dans l'eau des sources. Il est évident que ce moyen, encore pratique pour une grande ville, est inapplicable pour une exploitation agricole. Nous avons déjà dit que l'eau d'un puits ne peut être consommée sans épuration quand, à la suite des études indiquées dans la troisième partie, elles ont été reconnues contaminées, par exemple, par une ville située à l'amont. Jusqu'à présent, tous les germes pathogènes de maladies hydriques de l'homme sont asporulés. Ce sont aussi les plus sensibles à l'action des antiseptiques, ce qui rend le problème plus facile. Tout procédé qui permet d'éliminer tous les germes asporulés est donc celui qui convient en la circonstance.

Il est évident que le procédé devra être d'autant plus énergique que l'eau est plus contaminée. Ainsi par exemple, une ville, s'alimentant avec une eau de rivière, ayant reçu des égouts en amont de la prise, devra stériliser cette eau très dangereuse par un procédé plus énergique que si celle-ci n'avait reçu aucune eau usée.

En résumé, l'élimination complète des microbes d'une eau est une opération trop exclusive et coûteuse. L'organisme humain ne se développe nullement à l'abri des microbes, il est donc superflu de stériliser complètement une eau, si on ne supprime pas les autres portes d'entrée des différents germes (air, aliments crus, viande, lait, etc.).

(1) La surveillance des sources de la Ville de Paris, créée par M. de Selves, préfet de la Seine, à la suite du rapport de M. Duclaux, comprend deux parties, l'une médicale, dirigée par MM. les Drs A.-J. Martin et Henry Thierry, a pour but de connaître tous les cas suspects qui peuvent répandre sur le périmètre des sources, des germes jeunes et virulents, très dangereux. L'autre partie, que nous dirigeons, s'occupe de délimiter le périmètre d'alimentation de ces sources, d'étudier les changements qui surviennent dans la composition et la qualité des eaux de sources, et de prendre, de concert avec la surveillance médicale, les mesures de prophylaxie nécessaires au bon état sanitaire des périmètres.

Il faut faire un choix parmi les procédés de stérilisation, suivant la nature des eaux qu'on a à traiter, afin de s'éviter des dépenses inutiles. Pour chacun des procédés que nous allons passer en revue nous indiquerons, dans la mesure du possible, dans quelles circonstances on peut les appliquer.

II

PROCÉDÉS PHYSIQUES

Chaleur. — Les procédés physiques d'épuration ont cet avantage de n'introduire dans l'eau aucune substance étrangère qui puisse être nuisible à l'organisme.

Le meilleur procédé de stérilisation de l'eau est la chaleur. On sait que les microbes ne peuvent résister à une certaine température qui est ce qu'on appelle la température mortelle, variable suivant les espèces.

En suspension dans l'eau, certains meurent à la température de 65-70°. Les microbes sans spores sont dans ce cas, d'autres au contraire qui ont des endospores ne meurent qu'après une ébullition prolongée.

On peut donc obtenir une stérilisation complète en chauffant l'eau à la température d'ébullition pendant un temps suffisant. On admet généralement qu'une ébullition de dix à quinze minutes suffit pour obtenir la destruction de toutes les espèces sans spores. Il ne reste même que quelques rares germes sporulés.

Toutefois la pratique a montré que l'eau bouillie était plus lourde à digérer que l'eau ordinaire, et n'était pas très agréable au goût (1). Les Chinois emploient le thé pour la rendre digestible et éviter ces inconvénients. Non seulement l'ébullition tue les microbes, mais encore

(1) Certaines personnes prétendent que l'eau bouillie est aussi agréable à boire que l'eau non bouillie. Il est évident que l'imagination aide beaucoup pour déclarer que l'eau bouillie est indigeste.

elle modifie la composition chimique de l'eau. Elle décompose les bicarbonates alcalino-terreux (chaux et magnésie), en carbonates beaucoup moins solubles qui se déposent. Il est probable que le petit changement de goût observé, tient à une petite altération des matières organiques que l'eau renferme.

Pour traiter de grandes quantités d'eau, il faut se servir d'appareils à marche continue. Il y en a de nombreux modèles, par exemple ceux de Rouart, de Geneste et Herscher, de Siemens, de Vaillard et Desmaroux, de Maiche, de Lepage, etc. Ils permettent de récolter, après stérilisation, une eau ayant, à un degré près, la température qu'elle avait à l'entrée dans l'appareil. Il est nécessaire d'aérer l'eau bouillie avant de l'employer.

La chaleur est un procédé relativement coûteux pour stériliser une grande quantité d'eau.

Filtration. — La filtration est un procédé d'épuration naturelle des eaux, rencontré dans la nature chaque fois que les terrains perméables en petit forment une couche sédimentaire assez épaisse, sans solution de continuité. Malheureusement ces terrains ne sont pas suffisamment répandus à la surface du sol, ils y sont remplacés, en beaucoup de points, par des roches fissurées peu filtrantes.

Nous avons déjà eu l'occasion d'indiquer en quoi consiste la filtration. Nous rapellerons qu'elle résulte de la propriété qu'ont tous les corps, en contact avec une eau chargée d'impuretés, d'attirer à eux les substances en suspension et même certaines autres en solution.

Ce phénomène a lieu à la condition que les impuretés passent en deçà d'une certaine distance, très faible d'ailleurs, de la surface du corps attirant. On désigne sous le nom de *sphère d'attraction* cette zone d'activité. Ceci réalisé, il se produit, en sus de l'attraction, une adhérence très forte de l'impureté au corps filtrant.

Les grains de sable laissent entre eux des vides. Si

toutes les substances, que l'eau infiltrée tient en suspension, passent dans le rayon de la sphère d'attraction de chaque grain, elles seront attirées et retenues par eux. L'eau, au sortir du sable, ne contiendra aucun corps en suspension et par conséquent aucun microbe.

Mais admettons que, par un moyen quelconque, on élargisse suffisamment ces vides. Certaines substances en suspension échapperont alors à la *sphère d'attraction* et pourront ressortir avec l'eau à la base du sable.

Chaque grain de sable a sa sphère d'activité. Une particule peut passer en dehors d'elle sur une certaine épaisseur, mais, si la couche de sable est suffisamment épaisse, elle a des chances d'être attirée à un moment donné après avoir échappé à l'action d'un certain nombre de sphères d'attraction.

Il en résultera que dans de tels filtres la filtration sera incomplète, si l'épaisseur de la couche est insuffisante.

Les premiers appareils de filtration étaient formés de plaques de grès laissant passer l'eau à travers leurs pores. En principe ces appareils sont excellents, mais en pratique ils ont deux graves défauts. En premier lieu ces plaques se fendent très facilement, ce qui facilite le passage des germes. Ensuite, même quand elles ne sont pas fissurées, elles laissent passer les microbes au bout d'un certain temps. En effet, les substances organiques insolubles, ainsi que les microbes, sont retenues par ce filtre. Elles sont décomposées par certains germes que l'eau contient toujours et, remises en solution, elles constituent ainsi un bouillon de culture pour les bactéries retenues dans l'intérieur du grès. Grâce à cette arrivée de matières nutritives, les cellules se multiplieront et s'affranchiront de la force d'adhésion qui les retenait aux particules de la plaque. L'eau filtrée pourra être contaminée comme l'eau non traitée. D'autre part ces filtres ne peuvent être stérilisés.

On avait fondé beaucoup plus d'espérance sur les

filtres en porcelaine dont le plus ancien en date est le *filtre Chamberland*. Ils ont certains défauts des filtres en grès. Ils ne sont efficaces que si tous les huit jours on peut les laver, les brosser à grande eau et les stériliser (1). En opérant ainsi et à la condition de s'assurer que pendant la stérilisation les parois filtrantes ne se sont pas fissurées, on arrive à obtenir des eaux complètement stériles. Sans ces précautions le filtre Chamberland ou ses similaires sont inefficaces. Il en est de même des filtres en cellulose dont la pastille doit être changée tous les trois ou quatre jours.

Le point sensible de tous les appareils de filtration précités semble être de ne posséder qu'une très faible épaisseur de couche filtrante. Si, au lieu de grès ou de porcelaine, on prend une couche de sable stérilisé suffisamment épaisse, qu'on fasse filtrer à travers elle une eau contenant un microbe quelconque, l'eau récoltée à la base doit être stérile.

C'est l'expérience que M. Pottevin fit en 1903. Il prend une allonge, remplie de sable fin et stérile. Il amène à la partie supérieure de l'eau stérile à laquelle on ajoute des cultures pures du bacille du côlon ou du bacille de la fièvre typhoïde. Le débit est réglé de telle sorte que toute goutte atteignant le sable y soit immédiatement absorbée, c'est-à-dire que le sable ne soit jamais saturé d'eau. Nous savons déjà qu'un sable, en présence d'un excès d'eau, voit ses espaces lacunaires augmenter. C'est un inconvénient qu'il faut éviter quand on veut obtenir le maximum de filtration. En opérant comme il est dit, M. Pottevin a toujours obtenu pendant plusieurs semaines de l'eau stérile à la sortie de l'allonge.

En étudiant le sable après la filtration M. Pottevin a pu voir que les germes étaient retenus, encore vivants, à la surface des grains.

(1) M. Guinochet prétend qu'en filtrant à basse température on peut faire servir une bougie efficacement pendant plus de huit jours.

Ces expériences, quoique postérieures à celles de M. Miquel, dont nous allons parler, ont été citées avant parce qu'elles vont nous être utiles par la suite.

Filtre établi par MM. Miquel et Mouchet (à l'Observatoire de Montsouris). — A sa base un lit de briques de champ destiné au drainage des eaux, au-dessus un lit de 20 centimètres environ de graviers un peu gros, et enfin, au-dessus tout à fait, une couche de sable, assez fin, bien tamisé, de 1^m,20 d'épaisseur (1).

Les parois du filtre étaient formées d'un tuyau en fonte d'environ 1 mètre de diamètre et de 2 mètres de hauteur.

L'arrivée de l'eau se faisait au moyen d'un tuyau de plomb, muni d'ouvertures de place en place et enroulé en spirale.

Le liquide arrivait à la surface de ce filtre avec un débit uniforme mais tel qu'aussitôt déposée à la surface du sable l'eau est absorbée immédiatement. MM. Miquel et Mouchet se sont très étroitement attachés à éviter de noyer d'eau leur sable, ayant, sans cette précaution, constaté une marche défectueuse de leur filtre.

Il y a bien, à la surface, quelques flaques d'eau dues au colmatage de petites portions du sable supérieur, mais au point de vue de la filtration, elles n'ont aucune importance. Le point essentiel est que le sable ne soit pas saturé d'eau. On sait qu'il suffit, pour s'en assurer, de faire un trou suivant la génératrice du tuyau.

Toutes les fois qu'il y a non saturation en sable on ne trouve pas d'eau dans le trou ainsi formé. Au contraire toute l'eau qu'on déverse dans cette cavité doit être absorbée immédiatement.

L'eau récoltée à la partie inférieure était analysée à

(1) M. Miquel a remplacé ce dispositif par un autre plus simple : à la base, des briques de Bourgogne posées à plat. Au-dessus des dalles filtrantes en béton maigre, et directement au-dessus de celles-ci, du sable passant au crible de 2 millimètres carrés.

intervalles fixes. Contrairement à ce que fit M. Pottevin, le sable de ces filtres n'était pas stérilisé. Il contenait des microbes et également des matières organiques à sa surface. On se débarrassa de toutes ces impuretés par un lavage prolongé à l'eau ordinaire. Suivant MM. Miquel et Mouchet, il faut environ deux mois pour que le filtre soit déclaré bon à fonctionner.

Le lavage est suivi au moyen des analyses bactériologiques quotidiennes. On considère qu'il est terminé quand, pendant huit jours, les eaux filtrées ne contiennent plus le *bacterium coli commune*. A partir de ce moment le filtre ne laisse plus passer le bacille du côlon ni le bacille de la fièvre typhoïde.

Le sable blanc de Fontainebleau est plus pur que le sable de rivière et son lavage demande moins de temps. Il a l'inconvénient de se colmater trop vite et d'empêcher d'obtenir de gros débits.

Malgré les inconvénients du lavage, M. Miquel recommande l'emploi du sable de rivière criblé passant à la maille de 1 millimètre carré et débarrassé des grains non retenus par la maille de $0^{mmq},5$. A la suite de ce changement dans la nature du sable MM. Miquel et Mouchet ont pu augmenter la hauteur d'eau filtrée par jour et passer de $2^{m},40$ à $4^{mm},80$ et 5 mètres tout en continuant à obtenir de bons résultats.

L'arrivée de l'eau se fait en général par 9 orifices au mètre carré.

Le filtre de M. Miquel a fonctionné pendant deux années consécutives. A différentes époques il est nécessaire de faire un nettoyage de la surface sur environ 8 à 15 centimètres de profondeur, à cause des dépôts argileux qui colmatent les pores et diminuent le débit du filtre.

Le sable enlevé est lavé à grande eau, pour entraîner, les particules d'argile, et remis sur le filtre.

L'explication de l'action du filtre à sable de M. Miquel est la même que celle de l'expérience de M. Pottevin.

Le sable s'enrichit en germes tandis que l'eau s'en appauvrit.

L'essai de M. Miquel, sur un filtre ayant fonctionné pendant dix-huit mois, démontre la réalité de cette explication. Ce savant a eu l'idée de rechercher quelle était la richesse en bactéries d'un centimètre cube de sable, pris à différentes profondeurs.

Voici les résultats obtenus :

Microorganismes par gramme de sable.

	Bactéries.	Moisissures.
A la surface	202 000	14 410
A 0^m,05	273 000	8 000
A 0^m,10	363 000	1 410
A 0^m,20	420 000	510
A 0^m,30	642 000	255
A 0^m,40	564 000	170
A 0^m,50	11 300??	255
A 0^m,60	406 600	510
A 0^m,70	199 000	0
A 0^m,80	246 000	0
A 0^m,90	163 000	65
A 1^m,10	132 000	255
Gros sable de drainage	30 400	1 985

Dans l'eau de la canalisation alimentant le filtre il y avait 440 bactéries en moyenne, et seulement 22 bactéries dans l'eau filtrée. L'enrichissement du sable augmente jusqu'à 0^m,30 de profondeur puis diminue jusqu'au gros sable de drainage. Dans celui-ci, où les phénomènes d'adhésion capillaire sont moins intenses à cause de la grandeur des espaces lacunaires, la teneur en bactéries est bien moindre que dans le sable.

M. Miquel a recherché ce que devenait le bacille du côlon retenu sur le sable de son filtre. Ses expériences lui avaient en effet montré qu'en employant les plus grands débits l'eau ne mettait que soixante-six minutes pour parcourir 1^m,20 de sable et, malgré ce court espace de temps, tous les germes du bacille du côlon sont

Villes Allemandes. — *Ville[s …]*

Paris (Banlieue Ivry)
Kitzingen
Schweinfurt
Brunswick
Bremen
Altona
Hamburg
Magdebourg
Lubeck
Francfort-s-Oder
Breslau
Posen
Königsberg
Chemnitz
Schwerin
Stralsund
Berlin (Tegel)
Middelburg
Leiden
Groningen

Couches de
Couche.
Hauteu

F Boppemans - Sc.

Fig. 105. — Courbes indiquant le dispositi

... Hollandaises. | Villes Anglaises | Londres.

Leeuwarden
Schiedam
Dordrecht
Rotterdam
Utrecht
Amsterdam
La Haye
York
Leicester
Dublin
Liverpool
Edimburg
New-River
East-London
West Middlesex
Grand Junction
Southwark et Vauxhall
Lambeth
Chelsea

2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0
0.50
1.00
1.50
2.00
2.50

support
filtrante
...ur d'eau filtrée

...tif des filtres à sable dans différents pays.

arrêtés au passage. On les retrouve, dans le sable, jusqu'à une profondeur de 0m,50 seulement. Ils sont absents à la base du filtre.

M. Miquel a également montré que pour obtenir une eau filtrée très pure il fallait augmenter la vitesse de filtration. Ce résultat paradoxal s'explique de la façon suivante :

Tous les germes, dans les sables non saturés d'eau, doivent être retenus par la force d'adhésion. L'eau filtrée devrait alors être stérile. Il n'en est jamais ainsi. En effet, certaines espèces microbiennes peuvent vivre dans l'eau même très pure. Plus l'eau reste en contact avec le sable, plus elle entraîne de germes provenant de la multiplication des cellules retenues à la surface des grains.

Supposons que pendant une heure la multiplication des germes ait donné A bactéries à l'eau.

Ces dernières se dilueront dans le volume de liquide que le filtre débite en une heure. Si le débit est N mètres cubes, la richesse des eaux infiltrées sera $\frac{A}{N}$ par mètre cube, mais si N, c'est-à-dire le débit, augmente, $\frac{A}{N}$ diminue et l'eau devient plus pure.

Il y a donc intérêt à augmenter la vitesse jusqu'au moment où on arrivera à submerger le sable.

Peut-être, avant cette submersion, l'eau pourra entraîner les germes adhérents à la surface du sable si sa vitesse dépasse une certaine limite, mais jusqu'ici l'expérience ne permet pas de se prononcer sur cette hypothèse.

Conformément aux conclusions de la théorie de ce filtre, il suffit que l'eau se charge de matières organiques pour voir immédiatement le phénomène de la filtration diminuer. M. Miquel fit l'expérience en ajoutant de la peptone, à l'eau envoyée sur le filtre; trois heures après les eaux filtrées accusaient une recrudescence de bactéries.

Une fois la matière organique éliminée, le filtre reprend ses qualités primitives, puisque les bactéries ne trouvent plus d'aliments suffisants pour se développer.

Que deviennent les bacilles retenus à la surface des grains de sable ? Ne vont-ils pas, à la longue, colmater le filtre? D'après M. Miquel, pour 1000 bacilles du côlon contenus dans l'eau avant la filtration, l'analyse montre qu'on n'en trouve plus que *un* dans l'intérieur du filtre à sable. Les 999 qui manquent ont disparu et très probablement sous l'influence de la concurrence vitale. D'après ce que nous avons déjà dit, il est évident que les espèces *banales*, trouvées à la base du filtre, proviennent seulement de la multiplication des cellules à la surface des grains de sable. L'expérience suivante appuie cette déduction.

M. Miquel (1) a montré qu'une eau pouvait, en entrant, avoir une quantité de microbes variant de 400 à 100000, tandis qu'à la sortie du filtre on ne constate aucune variation correspondante.

L'eau filtrée contient donc des espèces banales, inoffensives pour les organismes vivants (2).

Qu'on submerge le filtre, comme Spring l'a montré, les pores du sable augmentent et la filtration est détestable. En présence de l'eau en excès les bactéries banales se multiplient plus rapidement. Si une eau, à l'entrée, renferme 1 000 germes, à la sortie du filtre elle en renferme plus de 100 000.

Ce filtre doit être couvert pour plusieurs raisons. Un filtre qui ne l'est pas se recouvre rapidement de végétations. En se détruisant les végétaux augmentent la richesse organique des eaux et facilitent la multiplication des germes, de là une filtration moins parfaite.

En outre, dans un filtre non couvert, l'évaporation de la surface est très grande, il se dépose du carbonate de chaux

(1) *Annales de l'Observatoire de Montsouris*, 1906.

(2) Dans ces recherches, on n'a pu rechercher, faute de moyens, les bactéries invisibles. Toutes réserves doivent être faites sur l'action du filtre à leur égard.

qui s'unit au sable pour constituer un grès de perméabilité moindre.

Enfin, dans les filtres non couverts l'eau s'échauffe en été, et la température des eaux filtrées s'élève. En hiver la partie supérieure du sable gèle et empêche ou retarde l'infiltration des eaux.

En couvrant le filtre, on évite ces inconvénients; malheureusement ce dispositif est très coûteux.

Un filtre de ce genre, ayant une surface de 16 mètres carrés, a été essayé à Châteaudun pendant huit mois par M. Miquel. Les eaux filtrées avaient, en moyenne, 10 bactéries au centimètre cube sans autre surveillance que celle du garde champêtre. Ce filtre est donc actuellement pratique pour les petites agglomérations. Pour de plus grandes surfaces des essais vont avoir lieu prochainement qui permettront d'étudier la façon de répartir uniformément l'eau à la surface du filtre.

M. Miquel conseille de n'opérer que sur des eaux très claires. Les eaux de rivière ou celles des sources troubles colmateraient trop rapidement le filtre et l'exposeraient à de fréquents lavages. Pour les eaux de rivière on emploie d'autres filtres à sable.

Filtres à sable ordinaires. — Les filtres à sable dits *système anglais* sont les plus anciens des filtres existants. Ils ont été inventés au commencement du XIXe siècle en Angleterre par *Simpson*, pour obtenir la clarification des eaux de rivière. On ne s'occupait guère à cette époque de l'épuration des eaux potables au point de vue microbien et on se contentait d'obtenir simplement des eaux claires. Un filtre semblait bien constitué quand l'eau arrivait limpide à sa sortie.

Ce n'est que plus tard qu'on eut l'idée d'étudier l'action de ces filtres sur les microbes contenus dans l'eau. On s'aperçut que ces filtres au moment de leur mise en marche ne donnaient qu'une épuration microbienne insi-

gnifiante, puis au fur et à mesure que le filtre fonctionnait, son débit diminuait ainsi que le nombre des germes. Si on voulait augmenter le débit en enlevant la couche d'algues développée à la surface du filtre, on constatait une augmentation brusque de la richesse microbienne des eaux filtrées. Cette couche biologique avait donc une action importante dans l'épuration des eaux. Elle a été

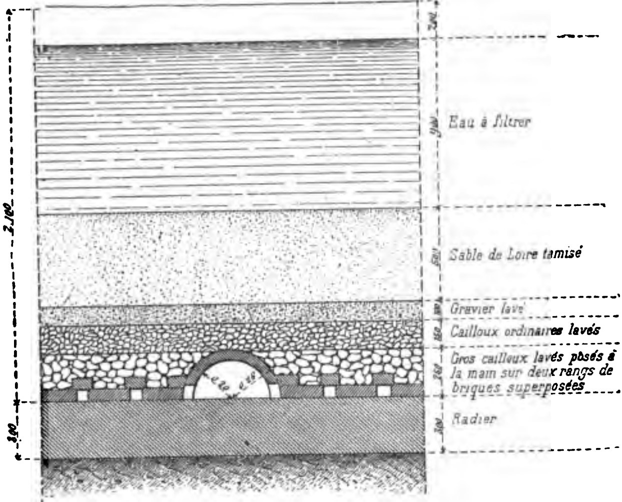


Fig. 106. — Filtre à sable (installation d'Ivry).

étudiée par la suite par un certain nombre de savants comme MM. Plagge et Proskauer, C. Frænkel et Piefke, Kemna, etc.

Un filtre à sable se compose essentiellement d'une cuve en maçonnerie remplie de plusieurs couches de sables de différentes grosseurs. La figure 106 montre la disposition d'un filtre établi aux usines d'Ivry pour la filtration des eaux de la Seine. On dispose les gros graviers et cailloux à la partie inférieure, les petits graviers à la partie

supérieure. Le sable fin dont on tend à augmenter l'épaisseur, en Amérique, est celui qui joue le rôle le plus important, les autres couches ne servent guère que de support. L'épaisseur de la couche filtrante et de la couche de support est très variable suivant les installations comme l'indique le graphique de la figure 105 (1) (p. 372-373).

On emploie du sable propre et lavé. La taille des grains a une très grande importance. On distingue la *grandeur effective* des grains de sable et *le coefficient d'uniformité*.

La *grandeur effective* d'un sable est le diamètre d'une sphère dont le volume serait supérieur à 10 p. 100 des grains les plus fins de ce sable et inférieur à 90 p. 100 des grains les plus gros.

Le *coefficient d'uniformité* d'un sable est le quotient du chiffre indiquant la taille d'un grain de sable qui serait plus gros que 60 p. 100 des grains du sable considéré, par le chiffre représentant la dimension d'un grain de sable qui serait plus gros que 10 p. 100 des grains du sable considéré. Ce coefficient varie de 1,7 à 3,0. Pour les sables lavés il atteint la valeur 3,8.

Ces définitions sont arbitraires, elles sont suffisantes pour fixer les idées et régler l'aménagement des filtres.

En Amérique, l'épaisseur de la couche du sable est de $0^m,90$. Après plusieurs décroûtages, nécessités par les nettoyages, elle diminue mais ne doit pas être inférieure à $0^m,60$.

Le filtre une fois constitué, on commence par le remplir très lentement avec de l'eau propre de bas en haut. L'air contenu dans l'intérieur des pores du sable se trouve ainsi chassé. En allant trop vite on risquerait de laisser dans

(1) Dans certaines installations, on préfère couvrir le filtre. Cette couverture est nécessaire dans les endroits où en hiver, la température moyenne de l'air descend au-dessous de 0°. Elle a donc l'avantage d'empêcher la formation de la glace, nuisible à la couche filtrante, et de modérer la prolifération des algues à la surface du filtre.

Elle est nuisible parce qu'elle empêche l'action stérilisante de la lumière solaire, elle est en outre très onéreuse.

l'intérieur du sable des poches d'air qui seraient nuisibles à une bonne filtration.

Il faut environ douze heures pour remplir ainsi le filtre. On laisse ensuite reposer vingt-quatre heures de façon à faciliter le tassement du sable. Puis on fait arriver l'eau par la partie supérieure. Il convient de maintenir à la surface du filtre une hauteur d'eau variable suivant les installations, comme on le remarque sur le graphique ci-dessus. En Amérique on préfère un mètre d'épaisseur d'eau pour que le vent, en créant des vagues à la surface du filtre, ne vienne pas altérer la couche filtrante. Un dispositif spécial permet d'obtenir un niveau constant.

Marche du filtre. — Pour commencer, le premier jour, on filtre une épaisseur de 1 mètre d'eau en vingt-quatre heures et progressivement pendant quatre jours on l'augmente pour atteindre la valeur normale, qui est à Paris de $2^m,40$.

A partir de ce moment le débit du filtre doit être uniforme, sans cela la charge supportée par la couche biologique et filtrante serait très variable, détruirait celle-ci et nuirait à la bonne filtration. Ce *desiderata* est obtenu au moyen d'appareils spéciaux automatiques. Dans quelques installations de faible importance on se contente plusieurs fois par jour de régler le débit à la main.

(1) Définition de Allen Hazen, *Conseil de santé de l'État de Massachusetts*, 1892, p. 549.

(1) Voici, rapportées par M. Le Couppey de La Forest, les stipulations du cahier des charges de la ville de Washington au sujet de la mise en place du sable : « Le sable filtrant doit être placé sur les filtres en trois couches, chaque couche devant avoir une épaisseur d'environ $0^m,30$; lors de sa mise en place, le sable ne doit pas être jeté de haut ou disposé d'une façon quelconque qui aurait pour résultat de le tasser irrégulièrement. Les deux premières couches doivent être posées jusqu'à la hauteur approximative qu'elles devront atteindre, sans qu'il soit nécessaire d'égaliser leur surface. La dernière couche doit être placée par fractions égales et régulières et sa surface établie plane et uniforme, et l'on devra se conformer dans cette opération à toutes les recommandations que fera l'ingénieur chargé de la surveillance des travaux.

« L'épaisseur du sable dans les différents bassins filtrants devra être quelque peu différente, afin de permettre après la mise en service de remettre, sur certains bassins, le sable nettoyé provenant d'autres bassins. »

Au commencement de la filtration, la pression de la la base du filtre est égale à la hauteur des couches de sable augmentée de la hauteur de l'eau à la surface du filtre. Mais petit à petit les espaces lacunaires du sable vont s'obstruer et la pression à la base du filtre diminuera. La diminution de pression ainsi obtenue s'appelle *perte de charge*. Elle ne doit jamais être supérieure à la hauteur de la couche d'eau au-dessus du sable. Au moment où elle atteint cette valeur, on arrête la marche du filtre pour le nettoyer.

Le filtre est vidé et le sable enlevé sur une épaisseur d'environ 2 à 3 centimètres, cette opération constituant ce qu'on appelle *un décroûtage*. On remplit ensuite le filtre comme il a été dit plus haut.

Ces décroûtages sont fort onéreux et doivent être aussi peu fréquents que possible; on y arrive en n'admettant généralement sur les filtres que des eaux ayant déjà subi une épuration préalable. La maturation d'un filtre neuf dure environ huit à quinze jours. Elle est d'autant plus longue que l'eau admise sur le filtre est plus propre.

Après un simple décroûtage, le filtre peut être mis en service au bout de trois à quatre jours et peut ainsi fonctionner sans nouveau nettoyage pendant vingt à trente jours.

Plusieurs décroûtages successifs diminuent l'épaisseur de la couche de sable fin. Celle-ci ne doit jamais être inférieure à $0^m,60$, sinon le filtre doit être refait complètement.

Le sable retiré de la surface des filtres est lavé à grande eau dans des appareils spéciaux. Malheureusement les algues sont fort adhérentes après chaque grain et il est impossible de redonner au sable ses propriétés primitives.

Ces filtres doivent être suivis très régulièrement. A Paris on a coutume de les contrôler tous les jours en recherchant le B. coli dans 40 centimètres d'eau. La présence du B. coli deux jours de suite dans un filtre est souvent la

preuve que la couche biologique laisse une solution de continuité.

Les analyses de la station de Lawrence montre que dans ces filtres il y a non seulement rétention des microbes mais encore combustion des matières organiques ainsi que nitrification des substances azotées.

	Eau brute. Milligr.	Eau filtrée. Milligr.	Réduction p. 100.
Matières organiques (en oxygène du permanganate)...	3,9	2,8	28
Ammoniaque libre..........	0,084	0,068	19
— albuminoïde ..	0,202	0,189	46
Nitrates (en azote)..........	0,14	0,31	»
Nitrites (en azote)..........	0,003	0,005	»
Nombre des bactéries (par centimètre cube).........	14 000	258	98,16

Membrane biologique. — En examinant la surface du filtre au microscope, on s'aperçoit qu'elle renferme des algues et des microbes, les derniers, arrêtés au passage, sont aux prises avec d'autres organismes mieux adaptés qu'eux aux conditions du milieu. Ils vont subir l'action de la concurrence vitale et, pour la plupart, se trouver détruits et digérés très probablement par un mécanisme analogue à celui qu'ont découvert M. Mesnil avec les coccidies et M. Mouton avec les amibes. Cette couche biologique ne doit pas agir seule. Il faut bien admettre que les 50 centimètres de sable sont nécessaires pour compléter l'action de la couche biologique et amener des transformations chimiques dans l'eau elle-même. La théorie actuelle tend cependant à diminuer l'importance des algues sur la couche biologique. On admet qu'à la surface du filtre il y a colmatage du sable et par conséquent diminution des espaces lacunaires, ce qui augmente le pouvoir filtrant du filtre. Toutefois les expériences de Miquel avec l'argile et l'oxyde de fer, n'ont jamais donné d'aussi bons résultats que le colmatage par les algues et les matières en suspension dans l'eau.

La couche biologique des filtres à sable a donc bien une certaine influence, qui est encore démontrée par les expériences de MM. Clark et S. Gage (1).

Ces savants ont montré qu'une eau additionnée de sulfate de cuivre diminue la puissance de filtration des filtres à sable. Ce sel ne détruirait guère que les algues de la surface, c'est-à-dire la couche biologigue, le sable, même colmaté, est donc insuffisant à lui seul pour filtrer convenablement.

La couche biologique semble agir en activant le phénomène de la concurrence vitale. Il y a lutte entre toutes ces espèces, et la plus vigoureuse est celle qui trouve les meilleures conditions de développement.

Ces conditions peuvent changer avec les saisons et une autre espèce peut se développer. Il y a donc lutte perpétuelle, aussi est-il toujours à craindre que, à un certain moment, les microbes pathogènes ne profitent d'un moment favorable pour passer dans l'eau filtrée.

Le Bureau d'hygiène de l'État de Massachusetts, qui a étudié la flore des filtres à sable, la divise en trois parties : 1° les algues vertes, 2° les algues bleues, 3° les algues brunes.

Suivant les saisons, la température, l'eau sera peuplée de l'une quelconque de ces trois espèces, sans compter d'autres organismes dont quelques-uns finissent par rendre le filtre inutilisable. Un travail très intéressant de M. Kemna, d'Anvers, nous montre combien la surveillance des filtres doit être active.

Ainsi, il arrive souvent que des algues flottent à leur surface. Tant qu'elles flottent, on n'a rien à craindre ; mais il faut arrêter la filtration aussitôt que l'eau se clarifie, parce que ces algues sont mortes et communiquent à l'eau une saveur désagréable.

L'éponge d'eau douce (*spongilla*) a été accusée de cor-

(1) Clark et S. Gage, *Journal of infectious diseases*, février 1906.

rompre les eaux en Amérique. Les Daphnées sont gênantes, ainsi que quelques crustacées.

Deux insectes peuvent troubler le fonctionnement du filtre, l'un est un petit moustique dont la larve rouge sanguin se construit un tube avec des grains de sable. Au moment de la métamorphose ces animaux quittent le fond pour venir à la surface. La couche biologique se trouve criblée, le filtre débite beaucoup plus et produit une mauvaise épuration. A ce moment les hirondelles apparaissent sur les filtres, ce qui est une indication.

Les Corisea (Hémiptères) se mettent à ramener à la surface les débris de la couche biologique et troublent l'eau.

On voit combien est délicat le fonctionnement d'un filtre qui, à des instants fréquents et assez mal précisés du reste, est sujet à une marche défectueuse. Aussi une surveillance appropriée est de toute rigueur sous peine de graves mécomptes.

Nous avons déjà dit qu'on ne devait pas filtrer une eau trop chargée de matières en suspension parce que le filtre serait rapidement hors d'usage et nécessiterait des décroûtages fréquents, ce qui est onéreux. Quand on doit traiter de telles eaux, il est indispensable de les dégrossir soit en les filtrant une première fois grossièrement, soit en les laissant se décanter.

Pour filtrer grossièrement ces eaux on emploie un filtre ordinaire en période de maturation. L'eau filtrée une première fois ainsi est renvoyée sur un deuxième filtre à sable en fonctionnement normal, d'où elle sort bonne pour la consommation. Les filtres à sable doivent pouvoir s'accoupler deux à deux dans ce procédé qui est le plus employé en Allemagne, ainsi que le montre le tableau ci-dessous.

Influence de la préparation préalable des eaux par décantation

VILLES.	TYPE de l'installation.	TRAITEMENT PRÉALABLE DES EAUX avant leur admission sur les filtres à sable.		NATURE DES EAUX BRUTES teneur bactériologique approximative (colonies par centimètres cubes).			NATURE DES EAUX DÉGROSSIES par décantation teneur bactériologique approximative.		
		Décantation (durée).	Infiltration.	Maximum.	Minimum.	Moyenne normale.	Maximum.	Minimum.	Moyenne normale.
Rotterdam. (Eau de la Meuse, rivière à marée.)	Filtres découverts.	1 jour à 1 jour 1/2.	Néant.	50.000	2.000	10.000	16.000	1.000	1.000
Schiedam. (Eau de la Meuse, rivière à marée.)	Filtres découverts.	1 jour.	Préfiltration réalisée à l'aide d'une installation filtrante ordinaire.	Mêmes eaux qu'à Rotterdam; les prises d'eaux des deux établissements sont situées à 8 kilomètres l'une de l'autre.			Comme à Rotterdam.		
Hambourg. (Eau de l'Elbe, rivière à marée.)	Filtres découverts.	1 jour à 3 jours.	Néant.	40.000	400	2.000	4.000	140	800
Berlin. Muggelsee. (Eau du lac Muggel.)	Filtres couverts.	Décantation naturelle par le lac Muggel.	Néant.	6.500	100	700	6.500	100	700
Zurich. (Eau du lac de Zurich.)	Filtres couverts.	Décantation naturelle par le lac de Zurich.	Préfiltration réalisée à l'aide d'un dégrossisseur à gravier ; simple filtration.	10.000	200	1.500	10.000	200	1.500

ou préfiltration sur le résultat final de l'opération du filtrage.

NATURE DES EAUX DÉGROSSIES par préfiltration teneur bactériologique approximative.			NATURE DES EAUX DÉGROSSIES admises sur les filtres à sable définitifs.		NATURE DES EAUX livrées à la consommation sortant des filtres définitifs teneur bactériologique moyenne.		VITESSE NORMALE de filtration à l'heure.
Maximum.	Minimum.	Moyenne normale.	Aspect.	Teneur bactériologique moyenne.	Numération réelle après 48 heures d'incubation.	Numération probable après 15 jours d'incubation.	
Néant.	Néant.	Néant.	Tantôt claires, tantôt louches.	1.000	70 Écarts de 5 à 200 bactéries (1899).	515	6 à 10 centimètres. Taille effective du sable : 0mm,38.
300 (Préfiltration	100	200 lente.)	Toujours extra-claires.	200	10 Écarts de 5 à 20 bactéries (normal).	515	6 à 10 centimètres. Taille effective du sable : 0mm,19.
Néant.	Néant.	Néant.	Tantôt claires, tantôt légèrement louches.	800	20 Écarts de 5 à 70 bactéries (1901).	147	6 à 8 centimètres. Taille effective du sable : 0mm,31.
Néant.	Néant.	Néant.	Claires.	700	20 Écarts de 5 à 70 bactéries (1899-1900).	147	6 à 10 centimètres. Taille effective du sable : 0mm,35.
3.000 (Préfiltration	200	700 lente.)	Toujours extra-claires.	700	25 Écarts de 5 à 150 bactéries (1899-1900).	184	15 à 20 centimèt. Taille effective du sable : 0mm,29.

Quelquefois on préfère la décantation. L'eau est amenée dans des grands bassins et abandonnée à elle-même pendant quelque temps. Les matières en suspension s'y déposent, on décante l'eau surnageant le dépôt, laquelle est envoyée sur un filtre à sable. Dans ce cas l'action stérilisante de la lumière solaire contribue, pour une part sensible, à l'épuration de ces eaux.

Pour celles moins chargées, le système Puech semble préférable parce qu'il occupe une surface moindre. Voici la description du système donnée par l'inventeur :

« L'appareil se compose de couloirs rectangulaires juxtaposés, d'une dimension égale, 22 mètres de longueur sur 2 mètres de largeur. Un mur crépi de ciment entoure tout l'ouvrage, qui est presque au ras du sol. La profondeur est de $1^m,80$. Le fond est cimenté. Deux cloisons en briques, cimentées également, séparent les bassins en les rendant indépendants.

« Deux tôles perforées, qui ont 1 mètre sur 2 et 4 millimètres d'épaisseur, sont posées de niveau, à côté les unes des autres, mais indépendantes. Elles forment comme un plancher à jour sur toute l'étendue de trois couloirs. Ce plancher reçoit une couche de gravier. L'épaisseur est de $0^m,35$ à l'amont pour se réduire à $0^m,20$ à l'aval, ce qui détermine une pente totale sur le gravier de $0^m,15$.

« La perforation de ces tôles n'est pas la même d'un couloir à l'autre. La grosseur des graviers, contenus dans chacun, diffère également, c'est ainsi que le couloir 1 est garni de tôles à trous ronds de 10 millimètres de diamètre qui supportent du gravier criblé de 12 à 15 millimètres de diamètre. Le couloir 2 a des tôles à trous ronds de 8 millimètres, qui supportent du gravier criblé de 10 millimètres. Quant au couloir 3, les trous de ses tôles sont oblongs et ont 4 millimètres de largeur sur 12 millimètres de longueur. Le gravier criblé est ici de 6 à 8 millimètres. Sous ces tôles le double fond décrit une pente dans la même direction, mais plus forte, égale à $0^m,25$.

« L'eau brute, admise dans la cuvette d'amont du couloir 1, envahit la couche de gros gravier, la tamise, remplit le double fond et vient se déverser dans la cuvette d'aval. Quand le niveau est suffisamment monté dans le couloir 1, on met celui-ci en communication avec le couloir 2. L'eau pénètre dans la cuvette d'aval, atteint la couche du gravier moyen, la traverse et, après avoir rempli le double fond, monte au niveau voulu. Aussitôt on ouvre la communication avec le couloir 3. L'eau pénètre dans la cuvette d'aval, puis sur la couche de gravier fin et dans le double fond. Quand le niveau est établi, on amène l'eau dégrossie par un conduit vers les filtres définitifs. »

L'eau abandonne sur ces différents graviers la plus grande quantité de ses substances en suspension. Cette opération préalable permet de ne recevoir sur le filtre que des eaux claires et de ne pratiquer les décroûtages qu'à des intervalles plus éloignés.

Ces dégrossisseurs sont d'un très grand débit, il faut les nettoyer très souvent, mais cette opération est simple, facile et peu coûteuse.

M. Chabal a fait voir l'influence des décantations et préfiltrations préalables sur la qualité des eaux filtrées (Voy. tableau, pages 384 et 385).

Système Anderson. — Nous avons vu que, dans le filtre à sable, la membrane biologique est un organe principal. Elle agit bien biologiquement mais son rôle est surtout de colmater les pores du sable de façon à augmenter l'action filtrante de celui-ci. On peut arrêter ce colmatage, en constituant dans l'eau à filtrer un précipité colloïdal.

Le système Anderson est basé sur ce principe. Dans de vastes cylindres appelés *revolvers*, renfermant de gros boulets en fonte, on fait arriver l'eau à traiter. On agite ces revolvers et il se dissout du fer sous forme d'oxyde ferreux. A l'air cet oxyde se transforme en oxyde ferrique, corps colloïdal insoluble dans l'eau.

Le contact de l'eau et des fragments de fonte dure environ quatre à cinq minutes. Par 1000 mètres cubes il se dissout de 500 à 3000 grammes de fer.

L'eau ainsi traitée est dirigée vers un filtre à sable ordinaire où elle abandonne son fer qui colmate les pores du filtre et facilite la filtration.

D'après les inventeurs, la matière organique diminuerait de 30 à 50 p. 100, toutes les matières en suspension seraient retenues, et la membrane supérieure et filtrante se formerait plus rapidement ; on pourrait également, sans inconvénient, augmenter le débit du filtre.

En réalité le procédé Anderson n'a pas répondu aux espérances des auteurs. Pour obtenir une bonne filtration, il est, bien entendu, très utile de diminuer les pores du sable, mais il faut encore empêcher la prolifération et l'accumulation des germes arrêtés par le sable, qui doivent mourir et être détruits. Dans le nombre, quelques-uns trouvent le moyen de proliférer et d'échapper à l'action de la concurrence vitale. Si la couche filtrante n'est pas suffisamment épaisse, comme c'est le cas des dépôts de matières colloïdales, ces microbes arrivent à gagner, au bout d'un certain temps, la couche sableuse inférieure peu filtrante, où ils ne sont guère retenus. Le filtre alors fonctionne mal. Au contraire si la couche filtrante est épaisse, les germes pathogènes qui prolifèrent à la partie supérieure ne trouvent plus guère, au fur et à mesure qu'ils s'enfoncent dans le sable, de conditions favorables pour se multiplier. Il est bien rare qu'ils échappent à l'action des germes adaptés à des milieux de plus en plus purs.

C'est pourquoi, si on veut filtrer une eau à travers du sable recouvert d'une couche colloïdale peu épaisse comme dans les filtres américains que nous allons voir, il faut s'astreindre à des lavages fréquents du filtre pour enlever artificiellement et souvent les germes retenus à leur surface et les empêcher, par prolifération, de gagner les eaux filtrées.

La conduite de ces instruments étant très délicate, nous

indiquerons les règles qu'on a l'habitude de suivre en pareil cas.

Règles édictées en Allemagne pour la filtration des eaux de surface. — Voici les règles édictées en 1894 par le *Gesundheitsamt* (notamment en cas de danger de choléra).

1° Pour apprécier la qualité d'une eau de surface filtrée, il y a lieu d'observer spécialement les points suivants :

a) L'effet d'un filtre peut être regardé comme satisfaisant lorsqu'il réduit le nombre des germes au minimum, sans dépasser la limite que l'expérience a montré pouvoir être atteinte par l'ouvrage considéré. Si l'on n'a pu encore réunir de données suffisantes sur les conditions locales de chaque ouvrage, notamment en ce qui regarde l'influence de l'eau brute, on prendra pour règle que le *produit d'un filtre ne devra pas contenir plus de 100 germes environ par centimètre cube.*

b) L'eau filtrée doit être aussi claire que possible, et, en ce qui regarde la couleur, le goût, la température et la composition chimique, ne doit pas être plus mauvaise qu'avant la filtration (?)

2° Pour contrôler constamment l'efficacité bactériologique de la filtration, on doit analyser *tous les jours* le produit de chaque filtre isolément : tout accroissement brusque du nombre des bactéries doit faire soupçonner et rechercher une cause de perturbation.

3° Pour permettre les recherches bactériologiques mentionnées au paragraphe 1, chaque filtre doit être construit de façon qu'on puisse à tout instant prélever un échantillon de l'eau qu'il fournit.

4° Pour assurer l'uniformité de méthode des analyses bactériologiques, le procédé suivant est à recommander :

Le milieu nutritif sera la gélatine peptonée à l'extrait de viande à 10 p. 100. On conservera les plaques aux environs de 20° et on fera la numération des colonies à la loupe, quarante-huit heures après l'ensemencement.

Si l'on conserve les plaques à une température inférieure à 20°, le développement des colonies étant lent, la numération devra être plus tardive.

Si le nombre des bactéries par centimètre cube dépasse 100, la numération est facilitée par l'appareil de Wolffhügel.

5° Les personnes chargées des analyses bactériologiques doivent prouver qu'elles sont expertes en la matière et appartenir autant que possible au personnel régulier de l'installation.

6° Quand le produit d'un filtre ne répond plus aux conditions hygiéniques requises, il doit être rejeté tant que de nouvelles analyses bactériologiques n'ont pas prouvé que la cause de trouble est écartée. Si un filtre ne donne plus, pendant un certain temps, qu'un débit insuffisant, il doit être mis hors de service, jusqu'à découverte et correction de la cause perturbatrice.

Il peut arriver que, dans certains cas et certaines conditions inéluctables, en temps de crue par exemple, il soit impossible de donner de l'eau répondant aux exigences du paragraphe 1 : en ce cas il faut se contenter de l'eau moins pure, mais si les conditions l'indiquent (comme en cas d'éclosion d'une épidémie) on devra en donner avis au public.

7° Pour pouvoir rejeter une eau insuffisamment filtrée et ne répondant plus aux conditions requises (§ 6), chaque filtre doit être construit de manière à permettre d'isoler son produit de la canalisation d'eau pure et de l'évacuer.

Cette évacuation doit avoir lieu, autant que possible, régulièrement : 1° aussitôt après qu'on a enlevé le dessus de la couche de sable ; 2° quand on a renouvelé entièrement cette couche. Le directeur appréciera, d'après l'expérience que lui auront donnée les examens bactériologiques, au bout de combien de temps après le nettoyage ou le renouvellement du sable le filtre aura recouvré son efficacité et pourra être remis en service.

8° Une bonne installation doit comporter une surface fil-



trante largement calculée et une réserve suffisante, afin que la vitesse de filtration reste modérée et soit bien proportionnée aux conditions locales et à la qualité de l'eau brute.

9° Chaque filtre doit pouvoir se régler directement et on doit pouvoir contrôler la quantité et les caractères de son produit, ainsi que sa perte de charge ; il doit pouvoir être vidé complètement, et, après un nettoyage, on doit pouvoir le remplir de bas en haut, jusqu'au-dessus de la surface supérieure du sable.

10° La vitesse de filtration doit pouvoir être établie pour chaque filtre au taux qui résulte des conditions les plus favorables; elle doit être régulière et à l'abri de toute variation ou interruption brusque. Dans ce but on doit avoir des réservoirs capables de parer aux variations horaires de la consommation pendant la journée.

11° Les filtres doivent être agencés de manière à ne pas être influencés dans leur travail par les variations de niveau du réceptacle des eaux filtrées.

12° La perte de charge due à la filtration ou à l'accroissement de pression sur le filtre ne doit jamais devenir assez grande pour produire des ruptures de la couche supérieure flottante (membrane) ; la limite à laquelle la surélévation de pression doit s'arrêter, doit être fixée dans chaque cas par l'étude bactériologique.

13° Chaque partie de la surface d'eau filtrée doit agir également et absolument comme les autres.

14° Le fond et les parois d'un filtre doivent être étanches, et l'on doit éviter que l'eau brute du dessus puisse se frayer un chemin quelconque pour gagner les drains d'eau filtrée; il faut notamment veiller à tenir bien étanches les ventouses destinées à l'aération des conduites d'eau pure.

15° L'épaisseur de la couche de sable doit être assez grande pour ne jamais être réduite par les nettoyages au-dessous de $0^{m},30$, et l'on doit, autant que possible, rester au-dessus de cette limite.



La plus grande attention doit être donnée à la couche supérieure du sable sali ; on mettra de côté la tranche immédiatement sous-jacente du sable coloré, et on la rapportera au-dessus du sable neuf dont on remplit le filtre.

Telles sont les règles allemandes, qui, depuis que ces instruments ont été observés dans leur fonctionnement, doivent être en partie modifiées.

A Paris, M. Miquel suit la marche des filtres, en recherchant le *b. coli* dans les eaux filtrées : La présence de ce bacille indique quelquefois une imperfection de filtrage le long de la paroi, imperfection toute passagère et non durable. D'autres fois, elle démontre la non-uniformité de la couche biologique, ce qui est plus grave, car cet accident demande plusieurs jours pour être réparé, et pendant ce temps, des germes suspects peuvent venir contaminer la partie inférieure des filtres. Voici les règles adoptées: En principe, un filtre à sable ne doit pas laisser passer le bacille du côlon. Si, pendant deux jours consécutifs, on décèle ce microbe, le filtre est déclaré suspect et mis en décharge pendant deux jours. Si ce germe est trouvé trois jours de suite dans les eaux filtrées, le filtre est déclaré *mauvais* et mis en décharge pendant trois jours consécutifs.

Enfin pour mettre un filtre neuf en service, il faut que, pendant cinq jours, il ne donne pas le bacille du côlon.

Ces filtres à sable ordinaires sont donc des instruments d'une telle fragilité, qu'une surveillance incessante doit être exercée sur eux.

Filtres américains. — Si les filtres à sable dits anglais ont des avantages, ils ont de nombreux inconvénients. La couche biologique en est très fragile ; dans les pays froids, si le filtre n'est pas couvert, l'eau se congèle. Les eaux très troubles, très communes en Amérique, ne pourraient se clarifier, même après plusieurs passages à travers ces filtres. Enfin ils ont un débit trop faible et tiennent trop de place.

Les Américains, par l'emploi de leurs filtres, débitent 30 à 50 fois plus que les filtres ordinaires qui s'affranchissent de ces divers inconvénients.

Les modèles de ces instruments sont nombreux, et reposent tous sur le principe suivant :

Dans une eau calcaire, le sulfate d'alumine se décom-

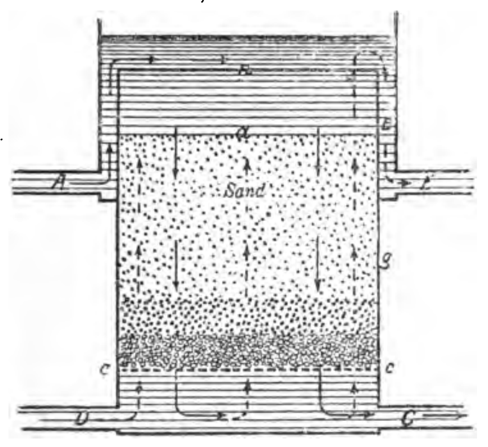


Fig. 107. — Coupe schématique d'un filtre rapide.

A, B, arrivée de l'eau ; *a*, couche de sable ; *c*, graviers ; C, sortie de l'eau : B, D, E, entrée et sortie de l'eau pour le nettoyage.

pose pour donner naissance à du sulfate de chaux et à de l'alumine. Cet oxyde, qui est colloïdal, se dépose, entraînant avec lui une certaine quantité de microbes et les matières en suspension que l'eau traitée renfermait. Ce mélange est passé sur un tambour horizontal ou vertical contenant du sable. L'alumine s'arrêtera sur le filtre, colmatera les pores de sa surface et contribuera à la filtration des eaux (fig. 107).

L'eau est filtrée sous pression, l'oxyde précipité, offrant au déplacement de l'eau à travers le sable, une résistance considérable.

Comme nous l'avons dit, ces filtres, à gros débit, doivent être fréquemment nettoyés. Un dispositif spécial permet, à cet effet, de faire passer de l'eau propre en sens inverse du courant primitif, en même temps qu'un agitateur remue le sable et favorise le lavage.

Ce filtre élimine 98 à 99 p. 100 des germes de l'eau.

Comme la filtration est très rapide, on n'y constate aucun phénomène de nitrification. Le gros inconvénient de ces filtres est d'exiger une eau calcaire et l'emploi continuel de réactifs en quantité suffisante, sans excès. C'est une affaire d'analyse, où une petite erreur peut avoir de graves conséquences.

Ce procédé qui trouve bien son emploi en Amérique, ne rendrait pas les mêmes services en Europe où l'on ne trouve pas d'eaux assez boueuses pour ne pas être traitées par les filtres à sable ordinaires.

Filtres Howatson. — Parmi un grand nombre de filtres, qui, pour la plupart, sont des dégrossisseurs comme ceux de Desrumeaux, Dervaux, Delhotel et Moride, Buron, Krœnpke, Candy, etc., nous citerons le filtre Howatson qui est un filtre à sable précédé d'un dégrossisseur et utilisant les propriétés oxydantes d'un corps appelé la *polarite*, composé d'oxyde de fer magnétique (14 p. 100), de silice (25 p. 100), avec addition de quelques autres corps : chaux (2 p. 100), alumine 6 p. 100, magnésie 7 p. 100 et alcalis 6 p. 100. Ce corps agirait comme la mousse de platine, absorberait l'oxygène de l'air et le concentrerait sur les matières organiques qu'il oxyderait. La durée d'activité de ce corps est de six semaines, après quoi il faut revivifier la polarite au moyen d'un courant d'air (fig. 108).

L'eau passe d'abord sur un dégrossisseur, composé d'une couche filtrante formée de silex concassé, supportée par un double fond rainé et perforé d'un grand nombre de trous, puis est introduite dans le filtre à sable à polarite. La filtration est intermittente. Ce filtre marche, par

vingt-quatre heures, avec un débit de 6 mètres cubes par mètre carré de surface. La réduction des matières

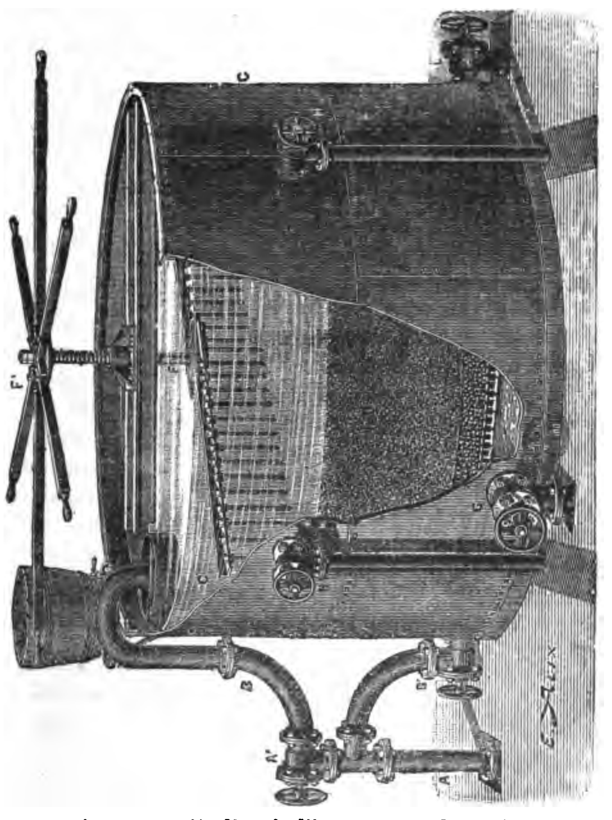


Fig. 108. — Filtre Howatson.

organiques serait, d'après l'inventeur, de 80 à 85 p. 100, et la réduction microbienne de 99 à 99,5 p. 100.

En résumé, pour les petites installations qui ne peuvent s'astreindre à une surveillance journalière et de tous les instants, le filtre de M. Miquel est de beaucoup le

meilleur et le plus pratique. Il est donc à recommander partout où il faut épurer des eaux suspectes.

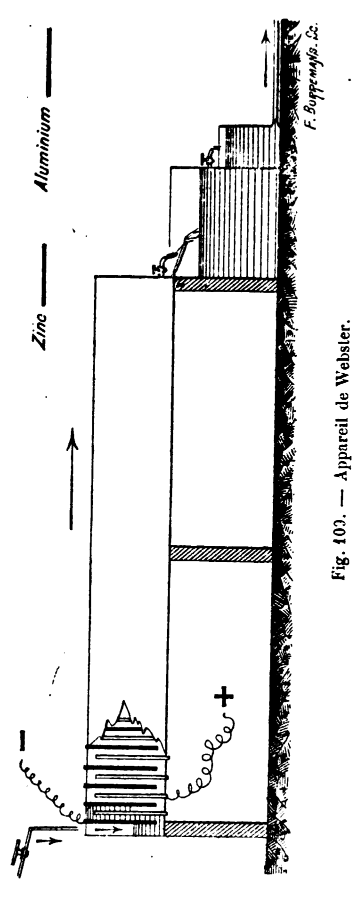


Fig. 109. — Appareil de Webster.

Procédés électriques. — L'emploi du courant électrique pour la stérilisation de l'eau a été appliqué par Woolf et par Webster.

Woolf décomposait, par l'électrolyse, une solution de sel marin. Il se produirait des hypochlorites, antiseptiques puissants. Ce procédé physique est donc en réalité un procédé chimique sur lequel nous allons revenir par la suite.

Webster produit électrolytiquement de l'alumine (précédemment de l'oxyde de fer), en faisant passer un courant dans une caisse rectangulaire (fig. 109), contenant alternativement des plaques d'aluminium et de zinc.

L'eau passe devant chaque électrode, l'anode étant formée par la plaque d'aluminium et la cathode par celle de zinc. L'alumine

qui se forme (et qui remplace l'alun des filtres américains) entraîne les matières en suspension et les microbes, l'électricité n'intervenant ici que comme producteur d'une substance chimique.

Le procédé Webster est donc bien un procédé physique mais l'électricité n'est pas l'agent d'épuration, c'est un simple agent de production. Il y a lieu de se demander toutefois si le zinc n'a pas une certaine influence nocive pour les microbes contenus dans l'eau.

III

PURIFICATION CHIMIQUE

Les filtres à sable ordinaire, comme les filtres en porcelaine ou en cellulose, demandent des soins constants pour fonctionner d'une manière convenable.

Ils peuvent laisser passer des germes, en particulier ces germes invisibles qu'on connaît mal encore et dont certains sont pathogènes.

Ceux qui sont partisans de ne fournir comme eau potable que des eaux stériles, condamnent tous les procédés physiques d'épuration, à l'exception de la chaleur. Ils préfèrent les eaux traitées par un moyen chimique susceptible de détruire tous les microbes.

Nous avons vu que tous les corps employés pour ce traitement étaient des oxydants détruisant la matière organique ainsi que les germes.

Ils ne peuvent être utilisés que si, après traitement, l'eau ne renferme plus une trace du corps employé. Si ce dernier est volatil ou facilement destructible, il est aisé de s'en débarrasser; si, au contraire, il est fixe, il faudra l'éliminer en traitant l'eau, de façon à n'y laisser qu'un corps inoffensif.

Les substances employées sont : le chlorure de chaux,

et les hypochlorites, l'iode, le brome, le permanganate de chaux ou de potasse, le peroxyde de chlore, l'eau oxygénée, le peroxyde de sodium, le chlorure de cuivre, l'ozone, les éthers nitreux.

L'iode agit à la dose de $\frac{1}{100\,000}$ et oxyde la matière organique. Après son action on y ajoute de l'hyposulfite de sodium, de façon à obtenir du tétrathionate de sodium et de l'iodure de sodium, corps inoffensifs aux doses présentes.

Le brome, oxydant et antiseptique, est, après son action, transformé par l'ammoniaque en bromhydrate d'ammoniaque inoffensif.

Le permanganate de potassium est un oxydant énergique et un puissant antiseptique. Ajouté en excès à l'eau, il tue les microbes. Puis on l'élimine en faisant passer l'eau sur un filtre en charbon, qui décompose le permanganate et retient le manganèse.

MM. Girard et Bordas ont remplacé le permanganate de potasse par celui de chaux. L'eau est ensuite filtrée à travers un bloc de bioxyde de manganèse, de façon à éliminer cet oxydant. Après cette opération, du corps employé, il ne reste plus qu'un peu de chaux.

L'eau oxygénée, également antiseptique, n'agit malheureusement qu'à une dose trop élevée. On peut la remplacer par le bicalcite (procédé Freyssinge-Roche) (bioxyde de Ca). Une dose de $0^{gr},3$ à $0^{gr},5$ de ce produit titrant 20 p. 100 d'eau oxygénée est nécessaire. On laisse en contact pendant deux à trois heures, puis généralement l'eau est filtrée à travers l'oxyde de manganèse.

Le manganate de baryum préconisé par M. Cambier, stérilise à la dose de 1 kilogramme pour 180 mètres cubes d'eau. Pour détruire l'excès de manganate on emploie le sulfate ferreux ou encore le fer.

Procédé Bergé. — Dans ce procédé, on emploie le gaz obtenu par l'attaque du chlorate de potasse, au

moyen d'acide sulfurique étendu de la moitié de son volume d'eau.

La réaction est représentée par la formule :

$$3ClO^3K + 2SO^4H^2 = ClO^4K + 2SO^4HK + 2ClO^2 + H^2O.$$

Le peroxyde de chlore est un gaz peu stable, soluble dans l'eau. Sa fabrication n'est pas exempte de dangers. On en fait une solution concentrée dans un volume d'eau restreint qu'on répartit ensuite dans la masse à stériliser.

On obtient ainsi la destruction des microbes et une réduction de la matière organique. Cette substance, comme le permanganate, n'agit que si elle est employée en excès. Après son action, elle est éliminée en faisant ruisseler l'eau sur le coke.

La présence de traces de ce réactif se reconnaît en ajoutant à l'eau de l'iodure de potassium et de l'empois d'amidon. Le peroxyde de chlore donne avec ce réactif une coloration bleue.

En dehors des dangers d'explosion, l'action de ce corps sur les matières organiques est mal connue. On ignore s'il ne forme pas avec elles des combinaisons nuisibles à l'organisme

D'autre part, M. Schoofs a récemment fait voir que dans ce traitement, il se formerait des hypochlorites et des chlorates, corps nuisibles. Enfin, s'il reste des traces de peroxyde de chlore, on constate une attaque des tuyaux de plomb, qui ne serait pas sans danger pour les consommateurs.

La réduction microbienne par ce procédé est très grande : la réduction organique ne dépasse guère 60 p. 100. La ville d'Ostende, qui avait commencé l'emploi de ce procédé, semble l'avoir à peu près abandonné à la suite de quelques accidents.

Procédé par l'ozone. — L'ozone est l'oxydant par excellence qui, par sa composition, n'introduit aucune

substance nuisible. En se décomposant, il donne de l'oxygène, dont la présence dans les eaux est nécessaire. Malheureusement, c'est un gaz insoluble, et pour arriver à détruire tous les microbes, il faudra le répartir dans toute la masse du liquide aussi intimement que possible.

C'est en 1893 que le baron de Tindall entreprit à Oudshoom, près de Leyde, des expériences de stérilisation en grand sur les eaux souillées du vieux Rhin. Les résultats furent favorables.

D'autres expérimentateurs renouvelèrent ces essais en grand; nous citerons parmi les plus connus : MM. Marmier et Abraham, Otto, Siemens et Halske.

C'est MM. Marmier et Abraham qui étudièrent les premiers, au laboratoire, les conditions d'une bonne stérilisation par l'ozone. Ils reconnurent, en faisant barbotter de l'air ozonisé dans l'eau, que la richesse de cet air en ozone devait être au minimum de 3gr,5 par mètre cube et que le contact de l'air et de l'eau demandait à être le plus intime possible.

Les résultats de leurs expériences, faites à Lille sur de l'eau claire, mais riches en germes (2 à 4 000 bactéries), furent contrôlés par une commission composée de MM. les Drs Roux, Calmette et Staes Brame, et de MM. Buisine et Bouriez (1).

Tous les microbes sont tués à l'exception de quelques germes très résistants, comme le *B. subtilis*, espèce saprophyte non pathogène.

Procédé Marmier et Abraham. — Ce procédé comprend trois parties :

1° La production du courant électrique;

2° La production de l'ozone;

3° La stérilisation de l'eau.

La figure 109, extraite du livre de M. Imbeaux, *Alimentation en eau potable*, montre le plan schématique d'une

(1) Voy. *Annales de l'Institut Pasteur*, 1899.

installation : « Le liquide est aspiré en *a* par une pompe centrifuge *b*, et envoyé au sommet *c* de la colonne de stérilisation *d*; un puisard *g* recueille l'eau traitée qui,

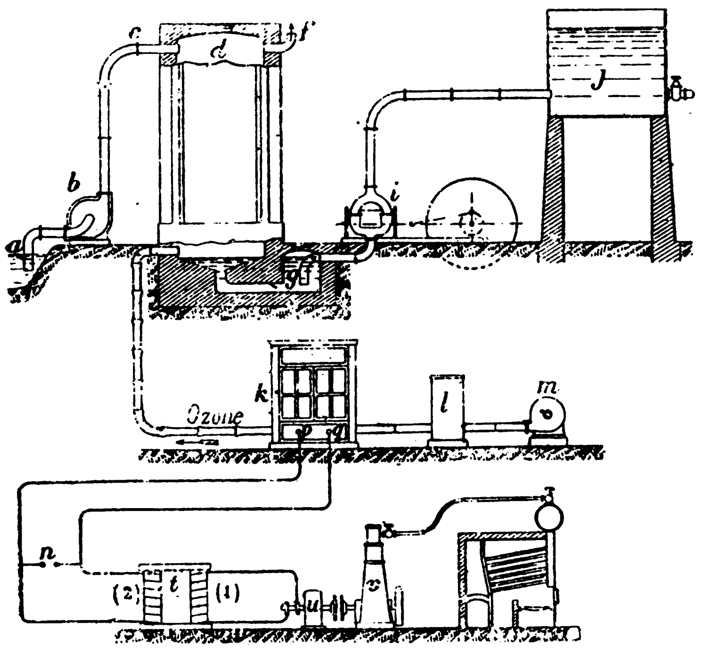


Fig. 109. — Installation schématique pour la purification des eaux par l'ozone.

a, tuyau d'aspiration; *b*, pompe centrifuge; *c*, arrivée de l'eau; *d*, colonne de stérilisation; *f*, départ de l'ozone après son action sur l'eau; *g*, arrivée des eaux stérilisées; *i*, pompe refoulant l'eau dans le réservoir *j*; *h*, ozoneur; *l*, dessiccateur; *m*, pompe à air; *n*, déflagrateur; *t*, transformateur; *u*, alternateur; *r*, moteur.

reprise par une pompe *i*, est refoulée au réservoir de distribution *j*. L'air ozonisé est amené en bas de la colonne de stérilisation qu'il traverse de bas en haut, pour sortir en *f*; sa circulation est assurée par un venti-

lateur *m* aspirant l'air atmosphérique, pour le faire passer du dessiccateur *l* dans l'ozoneur *k*, et enfin dans la colonne *d*.

Le dessiccateur n'est autre chose qu'un cylindre contenant de l'acide sulfurique concentré, qui absorbe la vapeur d'eau contenue dans l'air.

Enfin le courant électrique alternatif nécessaire pour produire les effluves électriques est fourni par un transformateur *t* dont le circuit primaire (1) reçoit le courant d'un alternateur *u*, actionné par une machine à vapeur *v* et son générateur; le circuit secondaire (2) fournit à l'ozoneur des courants d'une tension voisine de 4000 volts. En *n* on place un dérivateur sur le circuit de haute tension, un déflagrateur à boules, formé de deux sphères entre lesquelles jaillit une étincelle électrique, que l'on souffle continuellement au moyen d'air comprimé ou de vapeur : le rôle du déflagrateur est de maintenir entre les pôles de l'ozoneur un potentiel régulier, de plus, d'introduire, grâce aux étincelles, dans chaque période du courant alternatif, des vibrations intermédiaires qui accroissent notablement la concentration de l'ozone et, par suite, le rendement.

« L'ozoneur (fig. 110) de MM. Marmier et Abraham est formé d'une série d'électrodes métalliques D, recouvertes d'une glace P, séparées par un intervalle d'une autre glace P′ recouvrant une électrode métallique D^2, etc.

« Les électrodes de rang pair sont reliées à l'un des pôles du transformateur, les électrodes de rang impair à l'autre pôle. Entre les glaces jaillit l'effluve, qui transforme en ozone l'oxygène de l'air ; cet air ne peut sortir de l'appareil qu'après avoir traversé la zone d'effluves en suivant la direction *ao*.

« Les électrodes de chaque série sont refroidies d'une façon continue, de telle sorte qu'il n'y ait jamais de court circuit dans l'appareil. L'isolement de l'eau est obtenu par des coupures de la colonne réfrigérante, au

moyen d'appareils à égouttements, à l'entrée et à la sortie (1). »

La concentration obtenue est ainsi de plus de 2 grammes d'ozone par mètre cube d'air ; la densité d'effluve correspond à 4 ou 5 kilowatts par mètre carré d'électrodes.

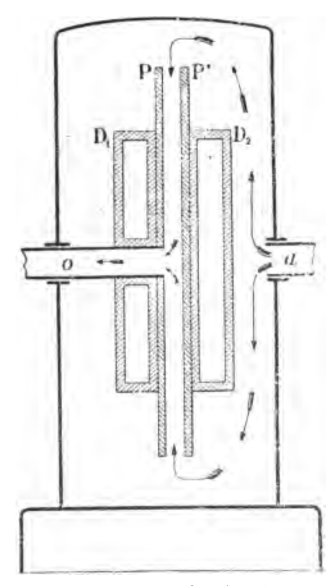


Fig. 110. — Ozoneur Marmier-Abraham.
P et P_1, glace formant diélectrique ; D_1 et D_2, électrodes métalliques ; *a*, arrivée de l'air ; *o*, départ de l'air.

La colonne de stérilisation a pour but de mettre l'air ozonisé en contact intime avec l'eau. C'est une simple chambre en maçonnerie, contenant des stratifications de divers matériaux concassés et formant filtres : l'ozone, entre par le bas, et l'eau tombe en pluie par le haut, les

(1) Description tirée de J. Ogier et Bonjean, p. 424 (*Traité d'hygiène* de Brouardel et Mosny).

gouttes d'eau ainsi divisées sont mises en contact prolongé avec le gaz oxydant dans les vides laissés libres entre les matériaux. Une trompe renouvelle le gaz par un appel énergique.

Système Otto. — Le système de M. Otto comprend un émulseur et un stérilisateur à plateaux. L'émulseur se compose de deux cônes concentriques. Par un ajutage se reliant au cône extérieur, on envoie l'air ozonisé. tandis que l'eau est amenée par l'autre cône et se divise en lame mince, subissant l'action efficace de l'ozone.

Le mélange se réunit dans un récipient, puis passe dans le *stérilisateur à plateaux*. Celui-ci est formé d'une superposition de vingt à cinquante plateaux à grande surface, sur lesquels l'eau séjourne et circule en lame mince de haut en bas, les orifices des plateaux alternant d'un côté à l'autre, de manière à assurer un écoulement en zigzag. L'ozone circule, lui, en sens inverse et s'échappe à la partie supérieure. Les producteurs d'ozone sont, pour le procédé Otto, de deux sortes : ou bien ils ressemblent aux appareils du procédé Marmier et Abraham (c'est ainsi qu'on stérilise les eaux de Nice), ou bien ce sont des appareils rotatifs qui semblent souvent fournir un air trop pauvre en ozone.

Procédé Siemens et Halske. — Dans ce procédé, l'eau est débarrassée des corps organiques en suspension en la faisant passer sur des filtres Brix, puis envoyée à la partie supérieure d'une tour à ozoniser, remplie de graviers de la grosseur d'œufs de pigeon. Ensuite elle ruisselle le long des graviers, tandis que le courant d'ozone circule de bas en haut dans la tour. Le gaz lèche les eaux qui ruissellent et les stérilise.

Installé à Martinikenfelde, en Prusse, ce procédé sert à épurer l'eau de la Sprée ; on ne cherche pas la stérilisation absolue, mais simplement une grande réduction microbienne (20 à 50 microbes par centimètre cube).

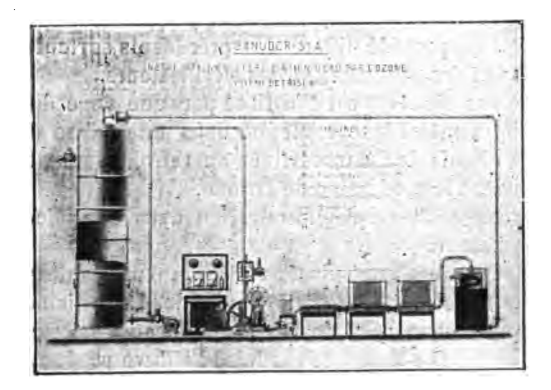


Fig. 111. — Stérilisation par l'ozone (système de Frise). Schéma de l'installation.

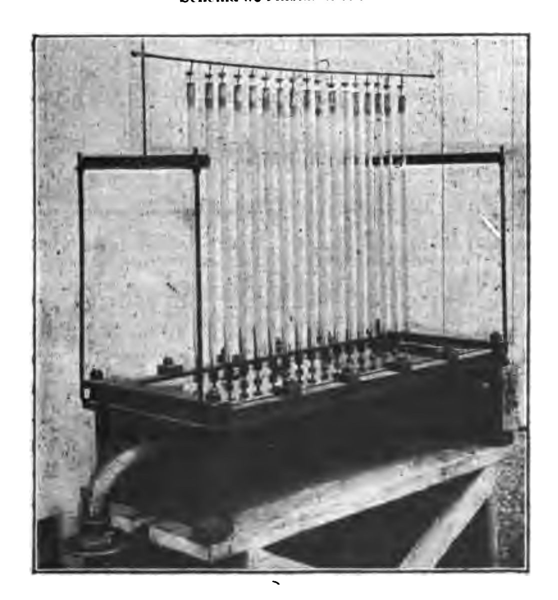


Fig. 112. — Ozoneur (système de Frise).

Procédé de la société Sanudor; système de Frise (fig. 111). Ce procédé diffère des précédents surtout par le dispositif des ozoneurs et des stérilisateurs.

L'ozoneur (fig. 112) est constitué par une auge demi-cylindrique métallique contenue dans une caisse dans laquelle circule de l'eau destinée au refroidissement de l'air pendant la production de l'ozone.

Cette auge est en communication avec un pôle du transformateur.

Dans cette auge sont placés verticalement des disques métalliques formant deuxième électrode. Leur diamètre est plus petit que celui de l'auge, de façon à laisser un espace libre dans lequel se produira l'effluve productrice d'ozone.

Ces disques sont dentelés légèrement et ont un diamètre de 52 millimètres.

L'auge et les disques sont couverts par une plaque de verre. Un dispositif spécial permet d'éviter les courts circuits qui donneraient des étincelles, nuisibles à la production de l'ozone.

L'air ressort de ces appareils à une température de 30°.

L'ozone est envoyé dans de grandes colonnes représentées par la figure 113, de façon à circuler de bas en haut.

L'eau à stériliser, qui doit être le plus pauvre possible en matières organiques et renfermer le moins possible de substances en suspension, arrive par la partie supérieure. Elle rencontre un plateau en celluloïde percé de trou, lequel est traversé par l'ozone de bas en haut. Ce gaz empêche l'eau de s'échapper par les orifices du plateau. Le liquide s'accumule sur ce plancher et à un certain moment trouve sur le côté un orifice qui l'amène à l'étage inférieur et ainsi de suite.

En plein fonctionnement de l'appareil, on constate, par ce dispositif, que l'air ozoné, à la plus grande concentra-

tion, agit sur les eaux les plus pures. Il y a ainsi meilleure utilisation de l'ozone ; l'air ozoné du plateau supérieur, le plus pauvre, sert surtout à oxyder les matières organiques qui gênent la stérilisation micro-

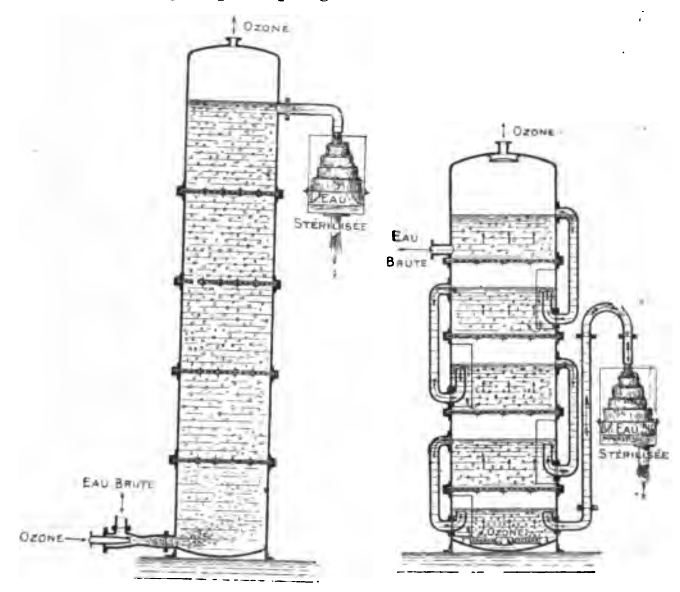


Fig. 113. — Colonnes à stériliser (système de Frise).

bienne des eaux ; celle-ci se fait surtout sur les plateaux inférieurs.

On obtient alors ainsi une stérilisation, paraît-il, parfaite avec de l'air plus pauvre en ozone.

Procédé a l'éther nitreux. — MM. J. Jean et Palamier ont préconisé un procédé de stérilisation fondé sur l'emploi de la pulvérisation à l'infini d'un mélange d'eau et d'éther nitreux. La pulvérisation se fait en injectant de l'eau sur un ventilateur à très nombreuses ailettes

appelé *atomiseur*. La division de l'eau en présence d'air produit une oxydation énergique des matières organiques. L'éther nitreux, à raison de 2 grammes par mètre cube d'eau, est décomposé et on obtient une très grande diminution du nombre des germes.

Ce procédé n'a pas encore été expérimenté en grand.

Considérations générales sur les procédés de stérilisation. — Les divers moyens de stériliser les eaux, indiqués dans un rapide exposé, sont relativement onéreux. Jusqu'ici rien n'est venu démontrer l'utilité de leur emploi là où les eaux ne reçoivent pas de contaminations venant de malades atteints de maladies transmissibles par l'eau. Dans l'état de la science ces procédés ne doivent être préconisés que lorsqu'on ne peut empêcher les contaminations suspectes de souiller irrémédiablement les eaux potables. L'avenir décidera s'il est nécessaire de rechercher une pureté microbienne des eaux, absolument parfaite.

IV

AMÉLIORATION CHIMIQUE D'UNE EAU

Une eau peut être inutilisable pour l'industrie si elle est trop riche en sels, ou bien encore si elle contient des sels de fer, ou de l'hydrogène sulfuré. Dans ces divers cas elles doivent être traitées chimiquement. Lorsqu'on dispose d'eaux de qualités différentes, on devra de préférence capter celles qui n'ont pas besoin d'être traitées, même si les frais de captage sont un peu plus élevés. Toute amélioration chimique d'une eau est, en effet, une opération assez dispendieuse.

Amélioration. — On prétend qu'une eau pauvre en oxygène est indigeste. Si cette assertion est un peu exagérée, on sait toutefois qu'une eau non aérée est moins agréable au goût.

L'aération de l'eau se fait soit en l'agitant énergique-

ment à l'air, soit en la faisant ruisseler sur des morceaux de coke, soit enfin en insufflant de l'air dans la masse liquide.

L'eau est très avide d'air, et par conséquent l'aération est très rapide. Certaines eaux profondes sont très pauvres en oxygène, et ont besoin d'être traitées par un de ces moyens.

Pour faire disparaître l'odeur désagréable que quelques-unes possèdent, on les aère énergiquement. Ce défaut tient à un développement anormal de certaines algues malodorantes. En Amérique, à Butte City (Montana), on devait aérer les eaux du lac artificiel servant à l'alimentation.

Au moyen d'un petit bateau on insuffla de l'air en tous les points de cette grosse masse d'eau et ce traitement suffit pour redonner à l'eau ses qualités physiques.

Là où la quantité à traiter est moins considérable, comme à Rochester (N.Y.) on se contente d'envoyer l'eau dans l'air sous forme de jets. En retombant, les filets liquides se résolvent en pluie et s'aèrent.

Adoucissement de l'eau. — Les eaux trop calcaires et trop magnésiennes ont un certain nombre d'inconvénients. Au point de vue industriel, elles sont le plus souvent nuisibles. Elles cuisent mal les légumes et lavent difficilement le linge.

En outre elles encrassent les machines à vapeur. Pour pallier à ces inconvénients, plusieurs moyens ont été préconisés, mais tous n'agissent pas également sur les substances calcaires ou magnésiennes, dont il faut les débarrasser.

Exposition à l'air et agitation — Le carbonate de chaux est très peu soluble dans l'eau. Sa solubilité augmente quand elle renferme du gaz carbonique. A l'air libre l'eau abandonne ce gaz plus ou moins vite et du carbonate de chaux se dépose. On connaît, en effet, les eaux pétrifiantes qui, aussitôt sorties de terre,

recouvrent de carbonate de chaux les objets qu'elles rencontrent. Mais les eaux moins riches en carbonate de chaux abandonnent plus lentement à l'air leur gaz carbonique et ce sel. Aussi dans les aqueducs, les eaux de la Dhuys (1) contenant 270 milligrammes de carbonate de chaux commencent seulement à abandonner leur calcaire vingt-quatre heures après être sorties de terre, celles de la Vanne (210 à 220 milligrammes de carbonate) seulement trente-six heures après. Enfin, celles de l'Avre (17° hydrotimétriques) n'ont pas le temps, pendant trente-six à quarante-huit heures de parcours, d'abandonner une trace de chaux.

L'agitation facilite le départ du gaz carbonique, surtout quand elle a lieu en présence de particules de carbonate chaux en suspension, comme des expériences personnelles nous l'ont montré.

On insuffle de l'air dans l'eau additionnée de 1 p. 100 de carbonate de chaux en poudre. Le départ du gaz carbonique se fait facilement et l'eau perd assez rapidement la moitié de son carbonate de chaux.

Chauffage et brassage avec la vapeur. — En envoyant un jet de vapeur dans une eau, il se produit un brassage énergique et une élévation de température qui favorisent le départ de l'acide carbonique.

C'est un procédé très employé pour déminéraliser une eau riche en carbonate de chaux.

Mais ce procédé ainsi que le précédent ne peuvent agir sur les eaux riches en sulfate ou en chlorure de calcium.

Dans ce cas on doit les traiter par congélation ou chimiquement.

Congélation. — Quand on congèle lentement un

(1) F. Diénert, *Sur la surveillance des aqueducs* (*Annales de l'Observatoire de Montsouris*, 1905).

liquide, les premières portions qui se prennent en glace sont très pauvres en sels minéraux.

Depuis longtemps on sait que les banquises, provenant de la congélation d'eau de la mer, donnent, par fusion, de l'eau douce et potable.

MM. Bordas et Imbart de la Tour prirent de l'eau de la Vanne dosant 190 milligrammes de calcaire. Ils purent, par congélation, obtenir une eau contenant 30 milligrammes de carbonate de chaux. Le résidu, riche en sels, marquait 60° hydrotimétriques.

Ce procédé permet donc de déminéraliser une eau, malheureusement il coûte relativement cher et n'est guère pratique lorsqu'il faut en traiter de grandes quantités.

Traitement chimique. — Le principe de ce traitement est le suivant. Étant donnés des sels de chaux et de magnésie solubles, les transformer en sels insolubles qui se déposeront. En l'espèce on les transforme en carbonate de chaux ou de magnésie, corps très peu solubles dans l'eau.

Si le sel de chaux ou de magnésie est un bicarbonate, on fait agir un alcali ou un alcalino-terreux.

$$(CO^3)^2CaH^2 + MO = CO^3Ca + CO^3M + H^2O,$$

M étant un métal bivalent.

Supposons que l'eau renferme 100 parties, en poids, de carbonate de chaux. Pour précipiter celui-ci, on emploiera :

Potasse..........................	94 parties.
Soude..........................	62 —
Magnésie..........................	40 —
Chaux..........................	56 —
Chaux éteinte..........................	74 —

Pour la magnésie il faudra un peu plus d'alcali que pour la chaux.

Si le sel de chaux est un sulfate, on traitera l'eau par un carbonate autre que celui de chaux ou de magnésie :

$$SO^4Ca + CO^3M = CO^3Ca + SO^4M.$$

En se servant d'un sel alcalin, de soude par exemple, pour éliminer le bicarbonate de chaux, il se forme du carbonate de soude qui précipite également le sulfate de chaux s'il existe. Si la proportion de carbonate de soude ainsi formée est insuffisante, on devra en même temps que la soude en ajouter une certaine quantité.

Voici un calcul qui permet de savoir la dose de ces deux corps à employer.

Si p est le poids de carbonate de chaux et p' celui de chaux, on ajoute un poids $p \times 0,62$ de soude qui précipite tout le carbonate de chaux à l'état de bicarbonate et, par suite de la formation du carbonate de soude dans cette réaction, transforme en CO^3Ca un poids égal à $1,36\ p$ de sulfate. Si p, le poids du sulfate, est plus petit que $p \times 1,36$, tous les sels de chaux seront précipités et il sera inutile par conséquent d'ajouter encore du carbonate de soude. Au contraire, si p' est plus grand que $1,36\ p$ il restera dans l'eau un poids de sulfate de chaux représenté par $p' - 1,36\ p$ et c'est sur ce nouveau chiffre qu'il faudra se baser pour ajouter la quantité de carbonate de soude, en multipliant ce dernier nombre $(p' - 1,36\ p)$ par 0,779. Avec le carbonate de potasse ce nombre serait 1,001, le carbonate de magnésie 0,617 et le chlorure de baryum 1,529.

Le chlorure de baryum a pour effet de transformer le sulfate de chaux en sulfate de baryum insoluble et en chlorure de calcium.

Comme on le voit, par ces réactifs, on ne cherche nullement à abaisser le degré de minéralisation d'une eau mais simplement à transformer certains. sels en de nouveaux corps d'une nature différente. Et ceci pour éviter que dans les chaudières, par exemple, les sels de chaux

cristallisent et viennent former sur les différentes parties de l'appareil d'évaporation une croûte très adhérente et dont la présence est un danger d'explosion. Au contraire l'inconvénient n'existe plus avec le carbonate de soude, le chlorure de calcium, le sel marin, qui se déposent au fond de la chaudière et qu'on retrouve dans les boues, très faciles à enlever. Pour le lavage du linge c'est le sel calcaire qui est nuisible parce qu'il forme avec le savon un corps peu soluble et empêche la formation de la mousse.

De même pour la cuisson des légumes, la chaux se combine dans leur intérieur et empêche la transformation des matières pectiques en substances solubles. L'emploi d'oxydes alcalins ou alcalino-terreux et de carbonates alcalins n'est pas nuisible à l'organisme. Au contraire les sels de baryum sont réputés nocifs.

On peut encore se servir de différents produits appelés désincrustants qui sont à base de carbonate de soude (1).

Le carbonate de soude agit sur le bicarbonate de chaux de la façon suivante :

$$(CO^3)^2CaH^2 + 2CO^3Na^2 = CO^3Ca + 2CO^3Na\,2CO^3NaH.$$

Sous l'action de la chaleur supérieur à 70° on a :

$$CO^3Na^2\,2CO^3NaH = 2CO^3Na^2 + CO^2 + H^2O.$$

C'est-à-dire qu'on retrouve intact le carbonate de soude introduit. Celui-ci agira sur le sulfate de chaux comme nous l'avons vu précédemment de telle sorte que, pour précipiter les sels calcaires, il suffira de connaître la quantité de sulfate de chaux et de calculer, avec un léger

(1) On appelle désincrustant, une substance capable de transformer le dépôt adhérant aux tubes des chaudières en un autre dépôt moins adhérent qui formera des boues et qu'on pourra facilement enlever. On emploie le carbonate de soude mélangé le plus souvent à de la matière organique. Cette dernière semble agir par les acides faibles qui se produisent sous l'influence de la chaleur. Ils aident à la transformation du dépôt de carbonate et de sulfate de chaux ou de magnésie. La matière organique employée est en général très riche en tanin ou en produits empyreumatiques comme le sucre caramélisé.

excès, la quantité de carbonate de soude à ajouter pour obtenir sa précipitation complète.

L'analyse d'une eau est donc nécessaire pour l'emploi rationnel de ces substances. Admettons qu'on n'ait que le degré hydrotimétrique total, temporaire et permanent, on fait le calcul suivant. Le degré permanent diminué de 3° et multiplié par 0,013 donne le poids des sulfates et chlorures par litre. Pour améliorer une eau servant à l'alimentation des chaudières il faut environ 7gr,5 de chaux éteinte par degré temporaire pour 1 mètre cube d'eau, soit 5l,5 d'eau de chaux. Il faut 10gr,6 de carbonate de soude pur ou 21 grammes de carbonate de soude hydraté par degré hydrotimétrique permanent.

Certaines villes traitent leurs eaux potables par la chaux.

La ville de Winnipeg (Manitoba) possède une eau artésienne de composition suivante :

Acide carbonique libre	22	milligrammes.
Carbonate de chaux	203	—
— de magnésie	113	—
Sulfate de chaux	6	—
— de magnésie	172mgr,5	
— de soude	65mgr,9	
Chlorure de sodium	396	—
Degré hydrotimétrique	48°,5	

Cette eau, fortement minéralisée, ne perd guère que son carbonate de chaux après un traitement par la chaux qui revient à 0 fr. 032 par mètre cube.

Parmi les grandes installations, celle de la ville de Southampton traite par la chaux le plus grand volume d'eau (20 000 mètres cubes par jour).

Eaux acides — L'eau ayant passé à travers les terrains humides riches en matières organiques, est acide. Si elle circule, au sortir de ces terrains, dans un sol calcaire, elle neutralise son acidité et n'a besoin d'aucun traitement, sinon il faut la faire passer sur des morceaux de carbo-

nate de chaux. Cette précaution est indispensable pour empêcher l'attaque des tuyaux de plomb. Si ces eaux sont filtrées sur sable, on commence par saturer une partie seulement de l'acidité avant la filtration au moyen de carbonate de chaux, puis, après la filtration on la neutralise complètement au moyen de chaux pure.

Déferrisation. — Certaines nappes profondes contiennent des doses assez grandes de sels ferreux et de manganèse, supérieures quelquefois à 100 milligrammes par litre. Par eux-mêmes ces sels ne sont pas nuisibles aux organismes, mais à l'air ils s'oxydent, et forment des oxydes ferriques et de manganèse insolubles. L'eau devient trouble, rougeâtre ou brune. En même temps il se développe dans ces eaux, certaines algues comme les *crenothrix* qui obstruent les tuyaux de la canalisation.

Le fer existe à l'état de carbonate ou de phosphate ferreux; le manganèse est très souvent à l'état de combinaisons organiques très stables.

Avant d'envoyer ces eaux dans la canalisation on peut oxyder leurs sels ferreux par une aération énergique, mais les sels de manganèse ne sont guère atteints par ce procédé. La ville de Breslau, en Silésie, s'en est aperçue en 1905.

L'Allemagne possède beaucoup d'eaux de cette nature, dans toute la partie où s'étendent les sables et limons d'origine glacière.

Procédé de Piefke. — Piefke est l'auteur d'un procédé industriel pour déferriser en grand les eaux.

On fait arriver l'eau à déferriser dans une colonne, ayant une hauteur variable de 2 à 4 mètres suivant la richesse en fer, contenant des morceaux de coke ou d'un corps poreux quelconque. Cette eau tombant en pluie sur cette colonne ruisselle sur le corps poreux, absorbe de l'oxygène qui transforme le fer en oxyde ferrique. L'eau récoltée à la base est envoyée sur un filtre à sable très grossier, quelquefois même, comme à Wildau, on

pratique une double filtration (fig. 114). Dans leur partie inférieure ces colonnes de coke retiennent de l'oxyde de fer qui les encrassent. Il devient donc nécessaire de les nettoyer de temps en temps par un fort courant d'eau.

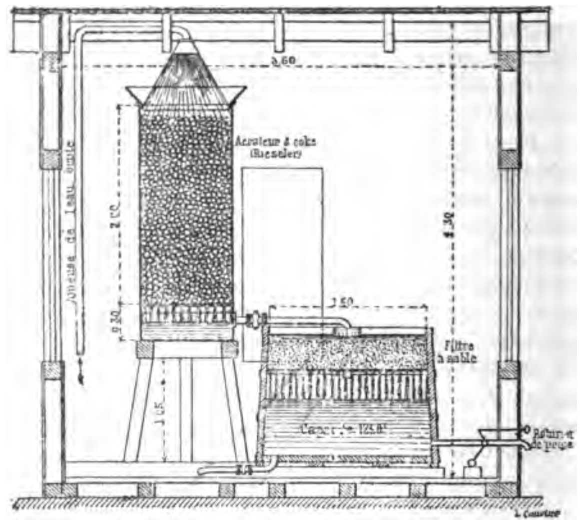


Fig. 114. — Appareil de Piefke (d'après MM. Debauve et Imbeaux).

Par ce moyen on arrive, à Kiel, à abaisser la teneur en fer par litre de 3 à 4 milligrammes à 0^{mmg},1.

Procédé d'Œsten. — Au lieu d'envoyer l'eau à travers une colonne de coke, on se contente simplement de la faire arriver en pluie à la surface du filtre à sable. L'oxyde de fer se dépose à sa surface et encrasse le filtre au bout d'un certain temps. Un dispositif très simple permet le nettoyage rapide, lequel a lieu généralement tous les mois. La richesse en fer tombe à Mittweida de 6^{mmg},5 à moins de 0^{mmg},5. Il existe même un appareil de ménage transportable basé sur le même principe. Il serait

très utile en France où se rencontrent, dans tous les terrains, de petites zones riches en fer dont les eaux se troublent à l'air. Comme nous avons eu souvent l'occasion de le constater, ces eaux sont très désagréables à boire et une déferrisation les rendrait potables. Certaines eaux renferment du fer sous une autre forme que le carbonate ou le phosphate, par exemple à l'état de combinaisons, avec l'acide humique ou l'acide crénique. Il faut alors employer un moyen d'oxydation plus énergique et Œsten préconise à ce point de vue l'emploi de l'ozone. Une application en a été faite dans un hôpital de Berlin. Dans cette ville on emploie une colonne formée d'une série de planches posées sur le champ et légèrement inclinées. L'eau ruisselle sur celles-ci puis est recueillie à la base dans un bassin de décantation et renvoyée sur les filtres à sable.

Procédé de Holle. — Au lieu d'envoyer l'eau en pluie sur un filtre, on peut la projeter au moyen de la force centrifuge sur un tamis qui la réduit en buée très fine et facilite l'action de l'oxygène de l'air.

Procédé chimique. — On sait que le perchlorure de fer est un oxydant. En le faisant agir en présence de chaux on obtient l'oxydation énergique des sels ferreux et leur précipitation rapide. Il ne reste plus qu'à faire passer cette eau à travers un filtre pour la débarrasser de ce dépôt.

Désulfuration. — Certaines eaux souterraines, comme celles des sables du Soissonnais, sont chargées de sulfures et d'hydrogène sulfuré qui communiquent à l'eau une odeur très désagréable. On fait disparaître cette odeur en oxydant l'eau par un procédé identique à celui employé pour éliminer le fer. Beaucoup d'auteurs estiment que ce procédé est inutile et qu'en très peu de temps l'hydrogène sulfuré est oxydé dans les carafes. Pour notre part nous considérons que l'eau garde longtemps une très légère odeur, sensible pour ceux qui ne boivent que de l'eau, et

qu'il faut pratiquer une oxydation très énergique pour lui enlever cet arrière-goût désagréable.

V

AMÉLIORATION DES QUALITÉS PHYSIQUES D'UNE EAU

Refroidissement. — La fraîcheur de l'eau est non seulement nécessaire pour les eaux potables mais encore pour certaines industries, comme la laiterie. En été les eaux de rivière sont trop chaudes, et on a cherché un moyen pratique et économique d'obtenir leur refroidissement.

Quand on n'emploie que peu d'eau, on refroidit celle-ci avec de la glace ou bien encore en utilisant les vases poreux appelés alcarazas. A travers les pores de ces récipients se produit une évaporation énergique qui refroidit le liquide intérieur. Ces procédés sont employés dans les ménages.

Au contraire, quand il s'agit de grandes masses d'eau, l'emploi de la glace n'est guère économique. D'après M. Imbeaux, le prix de revient d'un tel procédé de refroidissement serait de 20 à 30 centimes le mètre cube, chiffre très élevé puisque l'eau elle-même n'est vendue que de 30 à 50 centimes le mètre cube.

Le procédé le plus économique est l'irrigation des eaux sur une prairie et leur récolte par un drainage approprié.

On arrive facilement à obtenir ainsi une eau ayant une température de 10 à 14° centigrades.

Il n'est malheureusement pas applicable partout. Il faut pouvoir disposer d'un espace de terrain convenable (on ne doit pas irriguer plus de 50 000 à 100 000 mètres cubes d'eau par hectare et par an).

M. Leblanc a préconisé un système qui consiste à faire une aspiration énergique à la surface de l'eau de façon à accélérer l'évaporation. C'est donc ici encore le système

de l'évaporation qui reparaît. Des essais en petit, au dire de l'inventeur, permettraient d'obtenir un refroidissement de 10° C. pour un prix très minime allant à environ 0 fr. 02 par mètre cube.

En 1899, M. Dejust a proposé d'insuffler de l'air sec et chaud dans les galeries qui recueillent l'eau au-dessous des filtres à sables. A l'aide du calcul, on arrive à trouver que par ce moyen un mètre cube d'air à 100°, en se saturant, peut refroidir de 1° jusqu'à 363 k. 6 d'eau. Tout dernièrement le même ingénieur proposait d'installer un système ressemblant beaucoup, mais en grand, à celui des alcarazas. Malheureusement nous n'avons aucune expérience pratique qui permette de nous faire une idée suffisante de la simplicité et de l'efficacité de ces méthodes.

Au point de vue agricole, le seul procédé pratique, quand on pourra l'employer, sera celui de l'*irrigation* (1), ce qui revient à augmenter la nappe souterraine, si celle-ci n'est pas assez abondante.

Odeur. — Certaines eaux ont une odeur désagréable provenant généralement du développement de petits organismes qu'il faut chercher à détruire et à éliminer le plus possible.

Le département de l'Agriculture des États-Unis s'est occupé de la question, en raison de ce fait que les eaux d'étang sont très répandues dans l'alimentation de ce pays. Il a recommandé l'emploi du sulfate de cuivre.

Avant ce remède on avait préconisé la couverture des filtres qui, empêchant l'arrivée de la lumière, arrête ou ralentit le développement des algues.

Dans les grands réservoirs naturels on a diminué la matière végétale qui formait le substratum aux organismes en décapant très consciencieusement les végétations du fond qu'on remplaçait par un lit de fins graviers.

(1) Voy. Risler et Wery, *Irrigations et Drainage* (*Encyclopédie agricole*.

On a préconisé également, comme nous l'avons dit, les insufflations d'air dans les lacs, insufflations qui diminuaient beaucoup la teneur des eaux en acide carbonique, gaz favorisant le développement des végétaux, producteurs de mauvaises odeurs.

On a essayé également l'emploi des filtres à sables et des filtres américains.

On a reconnu, par des expériences très sérieuses, faites à Lawrence et à Springfield, qu'une simple filtration ne suffisait pas toujours à éliminer les germes encombrants. (*Dinobryon*, *Anabœna*, *Asterionella*) et même les *Anabœna* persistaient si souvent, qu'il fallait pratiquer une deuxième filtration.

Au contraire, en employant une substance peu coûteuse et facile à se procurer comme le sulfate de cuivre, le département de l'Agriculture des États-Unis est arrivé à se débarrasser de ces algues tout en employant des doses insuffisantes pour nuire à la potabilité de ces eaux. Toutefois chaque organisme a une sensibilité propre.

	Quantités d'eau pour 1 de SO^4Cu.
Chlamydomonas piriformis......	2000
Raphidium polymorphum.......	50000 à 75000
Spirogyra stricta............. .	75000 à 100000
Desmidium Swartzii............	100000
Stigeoclonium tenue............	50000 à 500000
Draparnaldia glomerata........	—
Navicula......................	200000 à 300000
Sechedesmus quadricauda......	300000 à 400000
Eaglena viridis................	—
Conferva bombycinum..........	1000000
Synura uvella..................	—
Closterium moniliferum.........	1000000 à 2000000

La station physiologique du département de l'Agriculture a cherché à quelle dose le sulfate de cuivre pouvait être nuisible pour l'homme.

A la dose de 1/1 000 000 il faudrait une absorption de 50 litres d'eau par jour pour arriver à produire un effet sensible, ce qui n'arrive jamais. En outre, comme on le fait justement remarquer, le sulfate de cuivre employé se fixe d'abord sur les algues qu'il est chargé de détruire et il n'en reste plus que des traces infinitésimales dans les eaux. Des essais en grand furent faits en 1901 dans une cressonnière de l'État de Virginia, infectée par les Spirogyra. Au moyen d'une solution à 1/50000000 de sulfate de cuivre on a réussi à se débarrasser de ces algues qui empêchaient la végétation du cresson.

En 1903 la ville de Kentucky, alimentée par un barrage-réservoir, se plaignait très vivement de la mauvaise saveur de son eau. L'analyse a montré qu'elle renfermait en moyenne 7400 *Anabœna*, 1100 *Clathrocystis* et 200 *Eudorina* par centimètre cube. On convint d'employer le sulfate de cuivre à la dose de 1/4 000 000, soit 50 livres de sel pour 95000 mètres cubes d'eau. On attacha ce sel, renfermé dans un sac de grosse toile, à l'avant d'une barque qu'un rameur promena par toute la surface de cet étang artificiel. Pendant deux jours l'odeur mauvaise dégagée s'accrut par suite de mort rapide de toutes ces algues, puis peu à peu elle disparut. Rapidement l'eau reprit sa couleur bleue normale. A l'analyse on ne retrouva plus d'*Anabœna* et la dépense ne fut guère que de 250 francs.

D'autres essais ont été faits sur d'autres points et ont donné des résultats très satisfaisants. L'eau consommée n'a pas été nuisible aux habitants, l'expérience a été faite en grand et d'une façon pratique, on peut donc recommander l'emploi du sulfate de cuivre dans tous les cas semblables.

Le département de l'Agriculture a également montré qu'en faisant plonger dans l'eau des feuilles de cuivre (1 centimètre carré pour 100 centimètres cubes d'eau) on obtient la mort des *Uroglena* et des *Spirogyra*. Pour les germes pathogènes comme le bacille typhique ou le bacille

du choléra il faut environ douze heures pour provoquer leur mort en employant le même procédé sur la base de 1 centimètre carré de cuivre pour 6 centimètres cubes d'eau.

Clarification. — Les eaux troubles sont peu goûtées. Certaines industries en plus, comme la brasserie, ne peuvent les utiliser.

Pour clarifier une eau on emploie plusieurs procédés :

Le premier de tous est la décantation. Quand on laisse une eau trouble au repos les particules en suspension s'assemblent et se déposent.

Les lacs et les barrages-réservoirs sont de grands bassins qui permettent aux eaux troubles de se clarifier. Les bassins de décantation sont de longs couloirs dans lesquels l'eau circule à travers une série de chicanes qui donnent le temps aux particules en suspension de se déposer.

Dans les eaux pauvres en calcaire l'eau reste longtemps trouble. Pour l'accélérer il faut ajouter de la chaux ou un coagulant.

A cet effet on emploie le sulfate d'alumine. Si p est la quantité de carbonate contenu dans l'eau, exprimée en milligramme, il faudra employer une dose de sulfate d'alumine : $A = 2 (p\text{-}5)$ en milligrammes. On soustrait 5 de p de façon à conserver toujours dans l'eau 5 milligrammes de carbonate de chaux. Le restant décompose le sulfate d'alumine et il se forme du sulfate de chaux et de l'alumine. Le temps que met la clarification à se produire dépend beaucoup de la limpidité de ces eaux. Plus elles sont chargées en matières en suspension, plus il faudra de temps. On admet qu'au-dessous du degré de turbidité = 400 (1) une heure suffit, pour 800 il faut deux heures, 1200, trois heures, 2000, cinq heures, mais, comme l'indiquent MM. Debauve et Imbeaux, il est préférable

(1) Chiffres lus au turbidimètre.

de faire des expériences directes dans chaque cas particulier, en se rappelant en outre qu'au laboratoire il faut environ 25 p. 100 de sulfate de plus que dans la pratique.

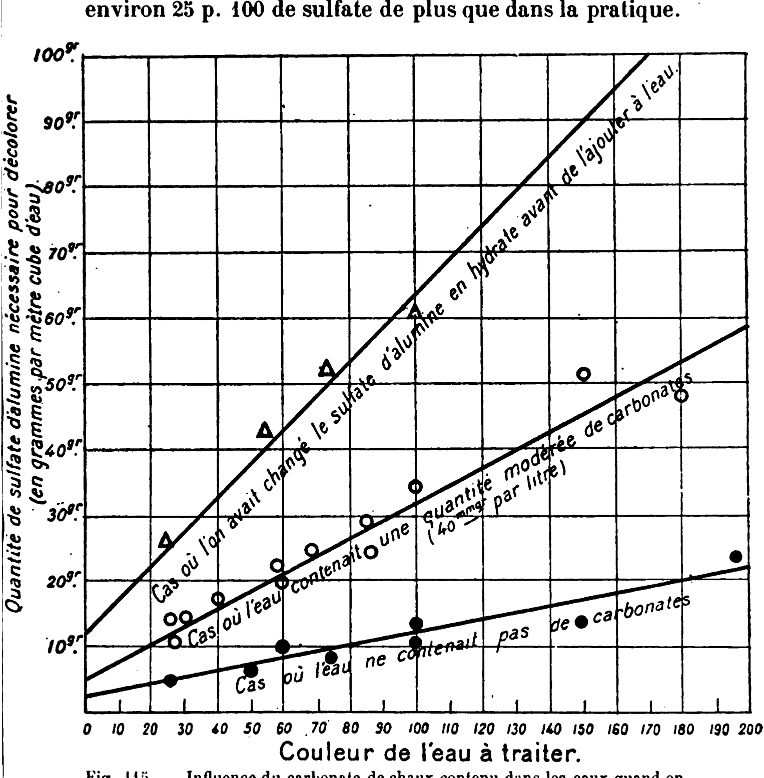


Fig. 115. — Influence du carbonate de chaux contenu dans les eaux quand on veut décolorer l'eau par le sulfate d'alumine.

On peut encore employer comme coagulant la chaux avec le sulfate ferreux. L'hydrate ferreux formé s'oxyde et se transforme en oxyde ferrique, lequel remplace ainsi l'alumine et se précipite. Les filtres de ménage sont

d'excellents appareils pour obtenir la clarification des liquides troubles.

Décoloration. — Certaines eaux, surtout en Amérique, sont très colorées et ne peuvent être consommées ainsi. Pour les décolorer on se sert d'un coagulant, le sulfate d'alumine qui, additionné ensuite de carbonate de chaux, se décompose en alumine insoluble, laquelle entraîne la matière colorante de l'eau en se déposant.

Le graphique ci-dessus indique la quantité de sulfate d'alumine nécessaire pour décolorer une eau plus ou moins colorée. Il montre l'influence néfaste du carbonate de chaux se trouvant primitivement dans l'eau (fig. 115).

VI

ÉPURATION DES EAUX USÉES

Au problème de l'alimentation en eau, succède celui tout aussi délicat de son évacuation après utilisation.

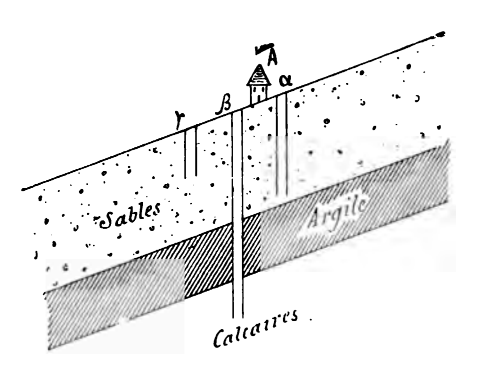


Fig. 116. — Diverses installations de puisard.

Très brièvement nous dirons quelques mots de l'épuration des eaux usées.

Le plus souvent à la campagne on se contente de les envoyer dans un ancien puits abandonné ou dans un « puisard », simple trou peu profond, où elles s'absorbent.

Au point de vue sanitaire (1) le puisard doit être banni, sauf dans quelques cas particuliers très rares, comme celui d'un puits (A ou β des figures 116 et 117) creusé dans un terrain dont les eaux de la nappe ne servent pas à l'alimentation, ou se perdent directement à la mer (fig. 117).

Si le volume d'eau à évacuer est faible et si le débit de

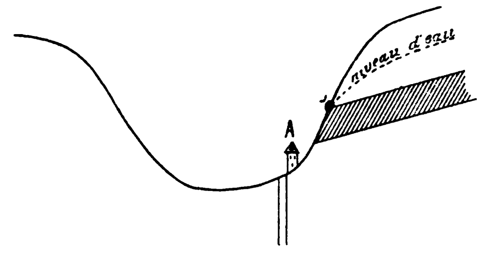


Fig. 117. — Installation de puisard.

la rivière voisine dépasse trente fois celui des eaux usées qu'elle reçoit, on peut faire l'évacuation directe dans le cours d'eau, sauf le cas où les eaux résiduaires contiennent des substances nuisibles à la vie des animaux et des plantes (2).

Quand on ne peut évacuer les eaux usées dans le cours

(1) Au point de vue juridique, voir les articles suivants d'Henry Thierry : 1° Assainissement des villages ; 2° Fumiers et fosses à purin (*Hygiène générale et appliquée*, mai 1906).

(2) La récolte des matières fécales se fait à la campagne dans des fosses non étanches le plus souvent. Pour notre part, nous croyons qu'il est préférable de préconiser la tinette mobile dont le principe est représenté figure 118, ou bien la tinette à système diviseur (fig. 119, 120, 121), avec lesquelles les parties liquides peuvent se rendre à la fosse à purin. Celle-ci, dans les terrains peu perméables, doit être drainée (fig. 122), si on veut éviter qu'elle ne se fissure et ne soit plus étanche.

d'eau voisin, il faut les traiter par un des trois moyens suivants :

1° L'épandage ;

2° Les substances chimiques ;

3° Les procédés biologiques.

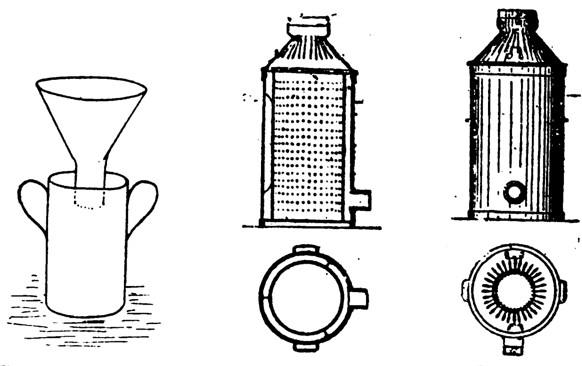


Fig. 118. — Binette mobile. Fig. 119. Fig. 120.

Épandage. — Les déjections humaines, les purins et les fumiers sont épandus sur le sol, où ils sont détruits par les microbes pour le plus grand bien de la végétation. Le volume de ces déchets est assez faible, mais il n'en est pas de même des eaux résiduaires fournies par les industries agricoles comme la brasserie, la laiterie et la distillerie.

Suivant l'importance de ces exploitations, il faudra disposer dans les environs d'un terrain suffisant pour les épandre. Si ces eaux sont très souillées il est indispensable que les conditions d'épuration soient aussi parfaites que possible, de façon à ne pas contaminer la nappe souterraine.

Les terrains perméables en petit sont les seuls qui conviennent dans ce cas. Les terrains fissurés ne peuvent

être utilisés que pour l'épandage des eaux peu souillées et là seulement où la roche n'est parcourue que par de très fines fissures. Dans les sables on peut irriguer à raison de 40 000 mètres cubes par hectare. Dans les

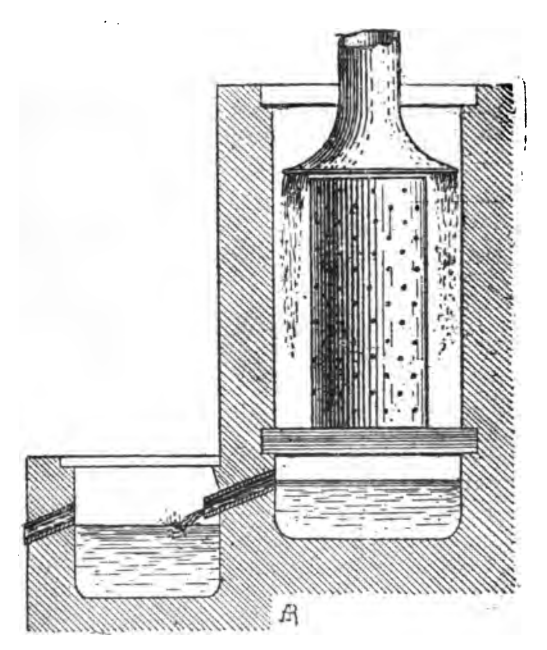


Fig. 121. — Système diviseurs divers.

terrains fissurés tels que ceux des régions calcaires, on diminuera beaucoup ce volume. Il est en outre indispensable d'y faire des cultures absorbant et évaporant beaucoup d'eau (prairies, peupliers, oseraies), de façon à diminuer l'arrivée des eaux épurées à la nappe.

Procédés chimiques. — Si on est trop éloigné des campagnes ou que le terrain dont on dispose ne permette

pas de pratiquer des irrigations, on peut s'adresser aux procédés chimiques pour épurer les eaux résiduaires. On sait en effet que ces eaux ne peuvent être évacuées dans une rivière de débit insuffisant, parce qu'elles contiennent des substances organiques facilement putrescibles qui dégageraient de très mauvaises odeurs et nuiraient à la vie des poissons.

Par les procédés chimiques on arrive à se débarrasser de ces matières organiques. A cet effet, on emploie la chaux, le perchlorure de fer, le sulfate ferreux, le sulfate ferrique, soit seul soit en mélange, c'est-à-dire tous corps susceptibles de coaguler les substances putrescibles et de les entraîner dans les dépôts qui constituent les boues.

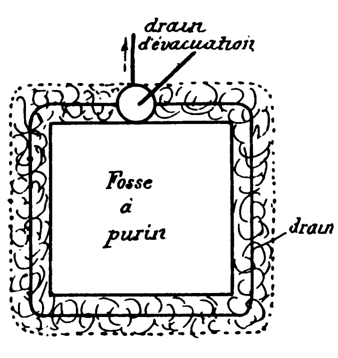


Fig. 122. — Fosse à purin.

En principe, dans ce procédé, on se sert de deux cuves dont l'une sert à mélanger la substance avec les eaux à traiter; l'autre reçoit le mélange, lequel est laissé au repos pendant un temps plus ou moins long, généralement vingt-quatre heures, de façon à permettre au précipité, formé par la substance chimique, de se déposer. Après le dépôt on décante le liquide surnageant qu'on évacue à la rivière, et les boues sont ensuite transportées dans les champs où elles servent d'engrais, de peu de valeur du reste.

Dans certains cas le traitement chimique de ces eaux précède le traitement bactérien, dont nous allons parler par la suite, comme, par exemple, dans le cas d'une eau riche en matière grasse.

Les eaux résiduaires qu'on évacue dans les puisards, ne sont pas traitées par les substances précédentes mais stérilisées complètement au moyen des hypochlorites, du chlore, du bioxyde de chlore, et même par l'ozone.

Le traitement chimique a deux graves défauts :

1° Il nécessite un apport continuel de substances chimiques dont le prix, quoique modique lorsqu'il s'agit de

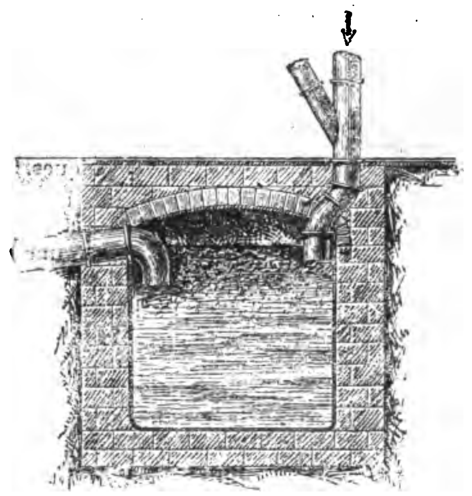


Fig. 123. — Fosse Mouras.

petites quantités, ne laisse pas de constituer un chiffre élevé pour le traitement permanent d'un grand volume d'eau.

2° Il se forme des boues constituant d'ailleurs un engrais de faible valeur, qu'il faut transporter ensuite sur les champs, et dont le plus souvent on est encombré, faute du terrain suffisant pour les utiliser au fur et à mesure de leur production.

On peut ranger dans les procédés chimiques la neutralisation des eaux acides ou trop alcalines qu'on ne peut évacuer sans ce traitement à la rivière.

Toutes les fois qu'on pourra éviter ou diminuer l'importance de ces boues par un autre procédé, il faudra abandonner les substances chimiques. Toutefois celles-ci sont absolument indispensables pour se débarrasser des goudrons que certaines eaux contiennent. Pour cela on les traite par le sulfate ferreux riche en acide sulfurique.

Procédé biologique. — Les eaux usées, débarrassées de leurs substances putrescibles, peuvent être évacuées sans danger. On s'est alors demandé si on ne pourrait arriver à ce résultat en faisant fermenter au préalable ces eaux dans des bassins spéciaux. De là sont nés les procédés biologiques.



Fig. 124. — Fosse Mouras mobile.

Ils sont basés sur le principe suivant : dans une cuve fermée on laisse une eau résiduaire au repos pendant vingt-quatre heures. Pendant ce temps elle subit une fermentation anaérobie qui a pour but de dégrader une grande quantité de matières organiques solubles et d'en solubiliser une certaine quantité de celle qui s'y trouvait en suspension. (On s'est aperçu qu'on pouvait obtenir le même résultat au moyen de fosses ouvertes mais profondes) (1).

Cette fermentation anaérobie prépare l'action des germes aérobies, qui va suivre, et en même temps solubilise une partie du dépôt, c'est-à-dire diminue la proportion des boues.

(1) La fosse Mouras (fig. 123 et 124) n'est autre qu'une fosse septique. Les matières arrivent dans une fosse étanche remplie d'eau. Une liquéfaction s'y produit et le tuyau de vidange de cette fosse ne peut évacuer que des substances liquides. Cette fosse ne se vide jamais.

Jusqu'ici cependant les expériences ne sont pas assez nombreuses pour indiquer dans quelle proportion cette fermentation anaérobie solubilise les dépôts. Quelques expérimentateurs même contestent cette action.

Après cette fermentation de vingt-quatre heures, on décante l'eau de ce bassin, appelé *fosse septique*, pour l'envoyer sur des lits formés de scories, de coke, ou tout autre corps poreux, appelés *lits bactériens*, où elles vont subir la fermentation aérobie.

Les germes aérobies possèdent la propriété de brûler les matières organiques, de les transformer en eau, acide carbonique et acide nitrique. Mais pour accomplir cette action ils ont besoin de beaucoup d'oxygène qu'ils rencontrent dans les corps poreux. Toutefois cette quantité est limitée et de temps en temps il faudra aérer à nouveau les lits bactériens de façon à leur restituer l'oxygène que les microbes leur ont pris.

En principe on met une heure pour remplir, avec l'eau sortant des fosses septiques, la cuve contenant les lits de scories. On laisse l'eau en contact pendant deux heures avec le corps poreux, et on fait la vidange pendant une heure. La cuve est laissée vide durant quatre heures de façon à récupérer son oxygène, puis on procède de nouveau à son remplissage. Ce procédé est celui des lits de *contact intermittents*; il nécessite des manœuvres nombreuses et par conséquent un personnel spécial. Au sortir du premier lit de contact, l'eau n'est pas suffisam ment purifiée pour être évacuée à la rivière, il faut la renvoyer sur un autre lit bactérien identique au premier, et, si cela est insuffisant, une troisième et même opération sera nécessaire.

Lits bactériens de contact (1). Installés par M. Calmette sur la rive droite de la Basse-Deule, à la station de la

(1) D'après le livre de M. Calmette, *Recherches sur l'épuration chimique et biologique des eaux*, Paris, 1906.

Madeleine-lez-Lille, sont au nombre de quatre ; ils sont disposés par paires en deux étages.

Les deux lits du premier contact, immédiatement contigus au bassin collecteur, ont chacun 192 mètres carrés de surface, 80 centimètres de profondeur, et une capacité volumétrique de 152 mètres cubes. Ils sont constitués par deux bassins rectangulaires à murs en pisé de scories (200 kilogrammes de chaux hydraulique par mètre cube de scories) sur un mètre de hauteur à partir du fond. La *sole* en béton de scories, est légèrement inclinée avec une pente de 2 centimètres par mètre dans le sens d'écoulement de l'eau. Elle porte un drainage en tuyaux de poterie non rejointoyés et rangés en forme d'arête de poisson (fig. 125, p. 438-439). Chaque bassin est rempli de scories ou machefer criblé à trois dimensions : la couche immédiatement en contact avec le drainage est formée sur 30 centimètres d'épaisseur de morceaux triés de 5 à 10 centimètres de diamètre. Au-dessus, sur 25 centimètres d'épaisseur, les fragments ont de 2 à 5 centimètres de diamètre et, à la surface, sur 25 centimètres d'épaisseur également, on a étalé une couche de grains fins de 5 millimètres à 2 centimètres de diamètre, bien débarrassés de poussières.

Le volume ainsi occupé par les scories dans chaque bassin est d'environ les deux tiers de la capacité volumétrique, soit exactement 153 mètres cubes. Leur capacité utile pour l'eau n'est donc plus que de 69 mètres cubes, en admettant qu'on les submerge entièrement. La surface de chaque lit est sillonnée de rigoles rayonnantes à partir du point de déversement de l'eau et creusée directement dans les scories sur environ 10 centimètres de profondeur (fig. 126, p. 434-435).

L'eau provenant du bassin collecteur est admise à la surface du lit lorsqu'on ouvre la vanne d'entrée correspondante. En avant de celle-ci, un déversoir en éventail, portant un rebord de trous plus étroits au milieu que

sur les côtés, assure la répartition aussi égale et rapide que possible de l'eau dans les rigoles sur toute leur longueur.

Les dimensions de la vanne et le nombre des rigoles sont calculés de manière à permettre le remplissage du lit en une heure au plus. A chaque remplissage, chaque lit reçoit environ 67 mètres cubes d'eau sortant de l'une ou l'autre fosse septique et préalablement emmagasinés dans le bassin collecteur.

Les deux lits de second contact sont exactement construits et disposés comme les précédents, en avant et en contre-bas, de telle manière que l'eau puisse être évacuée par une vanne des premiers sur les seconds,

Faute d'une dénivellation suffisante, M. Calmette a dû donner à ces lits de deuxième contact un peu moins de profondeur (70 centimètres) et un peu plus de surface (224 mètres carrés); leur capacité volumétrique est de 156 mètres cubes.

Leur évacuation est assurée par une vanne de sortie qui permet la vidange totale de chaque lit en une heure. L'eau épurée s'écoule dans un canal tapissé de carreaux de céramique et se déverse dans la Deule, après avoir alimenté un bassin dans lequel on élève des poissons (cyprins dorés) et diverses plantes aquatiques.

Ces dispositifs ont permis à M. Calmette d'effectuer ses expériences en variant à son gré les durées de contact de l'eau à épurer sur chaque lit bactérien. Les vannes d'entrée et de sortie se manœuvrent à la main.

M. Calmette a pu faire ainsi successivement 1, 2, 3 et 4 contacts par vingt-quatre heures, c'est-à-dire que chaque lit était alternativement rempli, puis vidé, aéré dans toute sa masse et rempli de nouveau de une à quatre fois par jour, l'eau restant pendant des laps de temps variables *en contact* avec les scories et avec les microbes auxquels les anfractuosités de celles-ci servent le support. (Calmette.)



Fig. 125. — Vue générale des lits bactériens de premier et de second con



ct à la station expérimentale de la Madeleine (d'après Calmette). (Voy. p. 432.)

Lits bactériens à percolation. — A cause de son intermittence le procédé des lits de contact a été presque abandonné et remplacé par le procédé des *lits bactériens par percolation* (1). Grâce à cet appareil, l'eau se répand sur les scories en quelques minutes, s'y infiltre, et permet à l'oxygène de l'air de venir immédiatement après au contact de la substance poreuse. La matière organique se brûle très rapidement et on obtient à la base de ces

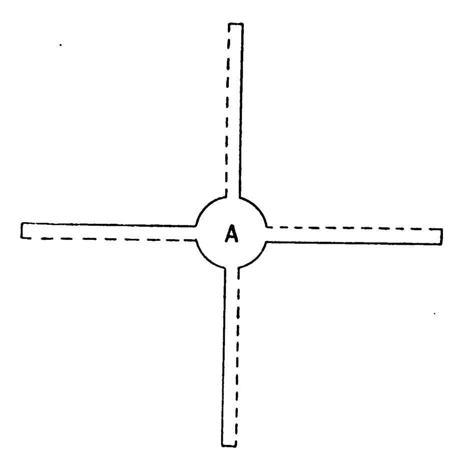


Fig. 126. — Tourniquet hydraulique.

lits à percolation, au bout d'une heure ou deux, une eau suffisamment épurée pour être envoyée à la rivière, quoique un peu louche.

Parmi les systèmes de répartition de l'eau à la surface des lits bactériens à percolation, nous mentionnerons les systèmes *pulvérisateurs*.

(1) Certains procédés emploient le tourniquet hydraulique (fig. 126) pour répartir les eaux d'égout à la surface des lits aérobies. Leur fonctionnement n'est pas régulier.

Le principe de ces systèmes consiste à placer sur toute la surface d'un seul lit bactérien de 2 à 3 mètres d'épaisseur, une série de tuyaux métalliques percés de distance en distance (tous les 1 m. 50 environ) d'un orifice sur lequel est adapté un ajutage pulvérisateur spécial.

L'eau d'égout sortant des fosses septiques est amenée à chaque tuyau par une *nourrice* (conduite à large section) dont le diamètre intérieur est calculé de manière que toutes les canalisations secondaires, perpendiculairement branchées sur elle, reçoivent une égale quantité de liquide. Toute la surface du lit bactérien se trouve ainsi couverte d'un réseau de becs *pulvérisateurs* (fig. 128, p. 440) qui projettent l'eau d'égout sous une pression suffisante pour obliger celle-ci à retomber en pluie fine sur les scories.

Un autre dispositif de lits bactériens à percolations est celui des gouttières à renversement automatique. M. Calmette a fait installer à la station expérimentale de la Madeleine-lez-Lille le distributeur *rotatif de Fiddian* qu'on peut voir fonctionner en Angleterre, à Walsall, à Birmingham, à Liverpool. Nous en empruntons la description et la figure à M. Calmette (fig. 129 et 130, p. 441 et 442). Il se compose d'une roue cylindrique de 23 à 38 centimètres de diamètre, dont toute la surface porte une série d'augets. Le remplissage successif de ceux-ci détermine un mouvement circulaire d'autant plus rapide que l'eau à épurer arrive en plus grande quantité.

L'alimentation des augets s'effectue par des déversoirs formant vases communicants avec un réservoir axial. Les augets se vident successivement à la surface des scories au fur et à mesure que la rotation de l'appareil s'effectue.

L'ensemble du lit bactérien, portant son distributeur rotatif sur rail, a seulement 2 m. 20 de hauteur environ pour une épaisseur de 1 m. 75 de scories. Il ne doit recevoir que des eaux préalablement débarrassées des



Fig. 127. — Construction des lits bactériens de la station expérimenta



de la Madeleine. Disposition du drainage au fond d'un lit. (Voy. p. 432.)

matières en suspension, par un séjour convenable en fosse septique. Les effets d'épuration sont aussi parfaits qu'on peut le désirer : le coefficient varie de 80 à 92 p. 100, avec un débit moyen de 1200 litres par mètre carré de

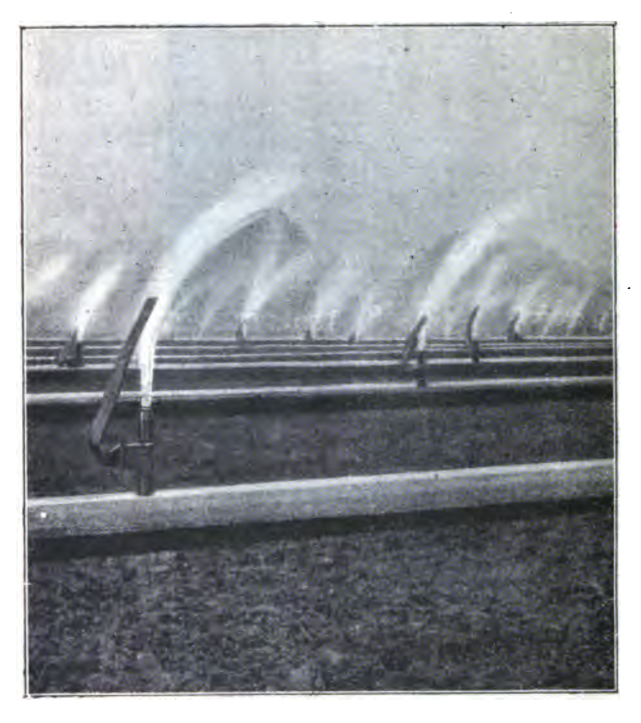


Fig. 128. — Becs pulvérisateurs des lits bactériens à Chesterfield (Calmette).

surface et par jour dans les expériences de M. Calmette, à la Madeleine-lez-Lille. L'eau épurée se montre toujours absolument claire et imputrescible, et cependant l'appareil marche sans discontinuité jour et nuit depuis trois mois.

La nitrification s'est établie rapidement et d'une manière active dans le lit alimenté par le distributeur Fiddian. Au point de vue bactériologique, M. Calmette a

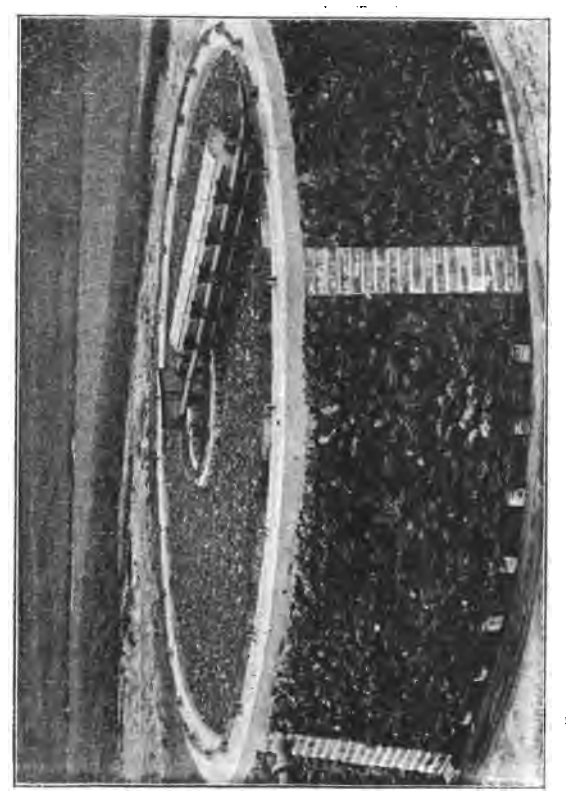


Fig. 129. — Lit bactérien et distributeur automatique Fiddian, à Liverpool. (p. 437.)

constaté que le nombre des microbes est plus faible que dans l'effluent des lits de contact : 1 400 000 germes cultivables en gélatine peptonée, comptés le 5e jour et 400 000 germes liquéfiants.

M. Calmette pense que si les distributeurs de ce genre peuvent rendre des services dans les installations urbaines de peu d'importance et surtout dans les casernes,



Fig. 130. — Lit bactérien et distributeur automatique Fiddian, à la station expérimentale de la Madeleine, p. 437.

collèges ou châteaux, les grandes villes auront avantage à éviter les appareils mécaniques susceptibles d'exiger des réparations fréquentes ou nécessitant des arrêts de fonctionnement.

Le dernier appareil automatique que ce savant emploie

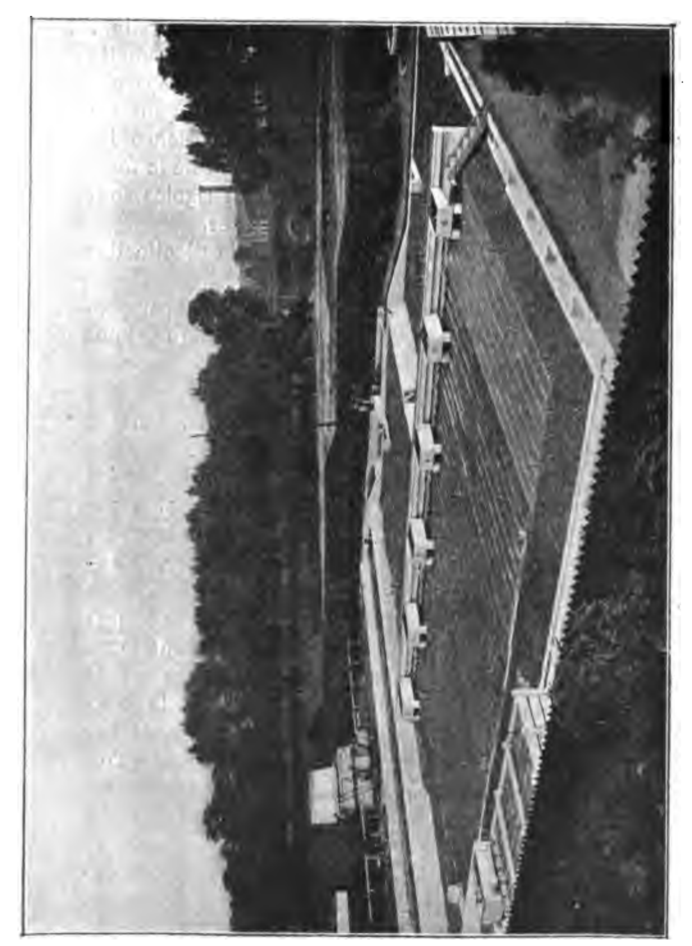


Fig. 131. — Lit percolateur de la Madeleine alimenté par des réservoirs de chasses automatiques. (Le réservoir n° 2 est entrain de se vider.) (D'après M. Calmette.)

pour envoyer par intermittence les eaux sortant de la

fosse septique, se compose d'une cuve de 100 litres environ. munie d'un dispositif qui s'amorce et se désamorce à la façon des siphons de chasse des appareils d'évacuation. La figure (131) représente une installation de M. Calmette à Lille. En 1, 2, 3, 4, 5, 6, sont les cuves des appareils de chasse. On aperçoit les rigoles creusées à la surface des lits de scories qui reçoivent par intermittence les eaux sortant des cuves 1, 2, 3, 4, 5, 6, venant de la fosse septique. Pour certains lits bactériens, les rigoles sont remplacées par des lignes de briques creuses.

Un drainage en tuiles faîtières permet la récolte des eaux épurées à la base des lits bactériens.

M. Calmette donne la préférence à la méthode par percolation qui, à l'avantage d'être plus économique, joint celui de donner de meilleurs résultats.

Toutes les fois qu'il s'agira d'épurer des eaux riches en matières azotées, il faudra d'abord les traiter dans la fosse septique et ensuite sur les lits bactériens.

Mais les eaux résiduaires des féculeries, des distilleries deviendraient acides dans la fosse septique parce que leurs matières hydro-carbonées, comme M. Rollants l'a démontré, se transforment en acides lactique, butyrique, etc.

On commence par les laisser déposer quelques heures seulement dans une fosse où elles abandonneront leurs matières en suspension, lesquelles colmateraient la surface des lits aérobies et en interromperaient le fonctionnement. L'eau décantée est envoyée directement sur les lits aérobies, et les résultats obtenus montrent qu'on obtient une épuration des plus satisfaisante. Un traitement préalable par la chaux est souvent nécessaire en sucrerie, distillerie, etc.

La grande supériorité du procédé biologique sur l'épuration chimique est son prix de revient beaucoup plus bas, en même temps qu'il diminue considérablement la proportion des boues. Mais il est évident que toutes

les fois qu'on le pourra il sera préférable de pratiquer l'irrigation. Dans certains procédés récents c'est le sol qui est employé comme lit bactérien. L'irrigation s'y pratique par intermittence et on arrive, paraît-il, par cette méthode à de meilleurs résultats qu'avec les lits de coke. La tendance actuelle est d'irriguer les champs au moyen des eaux sortant des lits bactériens.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

Hydrologie générale.

DEUXIÈME PARTIE

Hydrologie spéciale.

TROISIÈME PARTIE

Qualité des eaux.

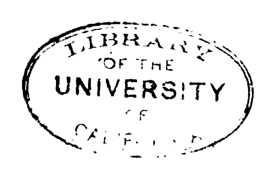


QUATRIÈME PARTIE

Captage des eaux.

CINQUIÈME PARTIE

Stérilisation et amélioration des eaux potables. Épuration des eaux usées.



FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

1549-04. — Corbeil. Imprimerie Éd. Crété.

Aide-mémoire de l'Agriculteur, par RAYMOND BRUNET, ingénieur agronome. 1905, 1 vol. in-16 de 410 pages, cartonné.. 4 fr.

Cet aide-mémoire contient :

Les renseignements concernant l'agriculture générale et l'agriculture spéciale, dans laquelle rentrent la pisciculture, l'entomologie agricole. — Les principales variétés d'animaux, avec leurs caractères distinctifs et des indications pratiques pour la reproduction. — Les machines agricoles, leurs dimensions et les quantités de travail que peuvent accomplir les ouvriers, les animaux et les machines. — Les matériaux de construction et les chiffres utiles du génie rural. — Les caractères des différents engrais. — Toutes les variétés de vignes, d'arbres fruitiers, de plantes potagères, de plantes industrielles.

On a groupé toutes ces matières en neuf chapitres intitulés : agriculture générale, agriculture spéciale, le bétail, le matériel et les machines agricoles, le génie rural, les engrais, la viticulture, l'arboriculture fruitière, l'horticulture potagère.

Une table alphabétique très complète rend les recherches faciles.

Hygiène rurale, par le Dr R. LAFFON, ancien interne des hôpitaux. 1904, 1 vol. in-16 de 160 pages.................... 2 fr.

Le milieu rural. — L'habitation rurale. — Hygiène corporelle. — Nourriture. — Boissons. — Maladies. — Dépopulation. — La médecine dans la campagne.

Les Paysans français, sous le rapport économique, agricole, médical et administratif, par COMBES. 1853, 1 vol. in-8....... 7 fr.

L'Union du Sud-Est des Syndicats agricoles, par SILVESTRE. 1900, 2 vol. gr. in-8 de 600 pages chacun et 1 atlas.......... 25 fr.

Les Syndicats unis. — Les Unions locales. — L'Union régionale. — Achats et Ventes. — Coopérative agricole. — Enseignement professionnel. — Prévoyance et Assistance. — Crédit agricole. — Assurances contre les Accidents agricoles, la mortalité du bétail.

L'Institut national agronomique (1876-1901). 1903, 1 vol. in-8 de 581 pages, avec planches................. 7 fr.

L'Institut national agronomique vient de terminer sa 25e année d'existence. Il a semblé intéressant à ses professeurs de mettre sous les yeux du public scientifique et agricole l'état actuel de son organisation. En parcourant les programmes détaillés des cours, on verra qu'à côté d'une instruction théorique très élevée les élèves reçoivent, tant à l'Institut que sur le domaine d'étude et dans les fermes où ils travaillent en stage et en mission, une éducation pratique des plus complètes.

Ce volume forme le tome I des *Annales de l'Institut national agronomique.*

Annales de l'Institut national agronomique. Tome II. 1903, 1 vol. gr. in-8 de 368 pages, avec figures..................... 7 fr.

Contributions à l'étude du drainage et de l'irrigation, par E. Risler et G. Wery ; de la culture du noyer en France, par J. Arthaud-Berthet ; de l'invasion des criquets dans les Charentes, par J. Ricard ; histoire du génie rural, par Max Ringelmann ; l'école supérieure de Vienne, par Ville-Chabrolle ; le marché beurrier anglais.

Tome III. 1904, 1 vol. gr. in-8 de 402 pages, avec figures...... 7 fr.

Muntz et Condon, Recherche de la falsification du beurre. — Delacroix, Altération des tubercules de pommes de terre. — Ringelman, Histoire du génie rural, etc.

Tome IV. 1er fasc. 1905, gr. in-8, 217 pages................. 3 fr. 50

L'Art de découvrir les Sources et de les capter, par E.-S. AUSCHER, ingénieur des arts et manufactures 2e *édition*, 1905, 1 vol. in-16 de 312 p., avec 88 fig., cart. 4 fr.

Ce livre a été écrit dans le but de mettre à la portée de tous les données les plus récentes sur la recherche et le captage des eaux. Toutes les municipalités, tous les propriétaires sont aujourd'hui en quête d'eaux saines et abondantes. Quatre livres divisent le travail.

Dans le premier, ce sont les propriétés de l'eau qui sont passées en revue : propriétés physiques, chimiques, température, nature géologique des terrains, variations des eaux, etc.

Dans le second, les eaux souterraines sont étudiées dans leurs relations avec les terrains : schistosité, cassures, failles, porosité, influence des pluies, régimes différents des eaux souterraines, puits artésiens et boit-tout, rivières souterraines, sources intermittentes, etc.

Dans le troisième, l'auteur s'attache à la recherche des sources et des eaux souterraines. Après un historique de la question (baguette divinatoire, sorciers, procédés scientifiques) il fixe les signes extérieurs qui révèlent aux savants les diverses connaissances de la géologie et de la topographie.

Dans un dernier livre, M. Auscher passe aux applications de la pratique hydrographique proprement dite. Il aborde le captage des eaux, ou ensemble des travaux qu'il est nécessaire d'effectuer pour arriver à utiliser les eaux des sources, des puits ou des puits artésiens : d'où découle une étude détaillée du captage des eaux : 1° derrière un barrage ; 2° dans des galeries ou drains ; 3° dans des puits.

Le volume est terminé par un chapitre sur la législation des eaux.

Les Engrais et la Fertilisation du sol, par A. LARBALETRIER, professeur à l'Ecole départementale d'agriculture du Pas-de-Calais. 1891, 1 vol. in-16 de 352 pages, avec 74 figures, cartonné.. 4 fr.

Aujourd'hui, l'agriculture, pour être productive et rémunératrice, doit viser de hauts rendements, c'est le seul moyen d'abaisser les prix de revient. Pour y arriver, il y a, indépendamment des bons procédés de culture, deux facteurs qui prédominent de beaucoup : d'une part, le choix des variétés améliorées et, d'autre part, l'application judicieuse des engrais. Mais cette dernière nécessite aujourd'hui des connaissances chimiques que tous les agriculteurs sont loin de posséder, c'est ce qui explique pourquoi l'emploi de tel engrais peut donner aux uns d'excellents résultats, tandis qu'il met les autres en perte ; il faut tenir compte de la nature du sol, de l'époque de l'épandage, de la dose à appliquer, et aussi de la répartition dans la terre. Ce sont des notions que M. Larbalétrier a cherché à mettre en évidence.

L'alimentation des plantes et la terre arable. Les éléments de la fertilité du sol. Les amendements, chaulages, marnages, plâtrages. Les engrais végétaux. Les résidus industriels et les tourteaux de graines oléagineuses. Les engrais animaux, le guano, les excréments liquides et solides, les purins. Les engrais organiques mixtes et le fumier de ferme. Les engrais chimiques, engrais azotés (nitrates et sels ammoniacaux) ; engrais phosphatés (minéraux organiques, scories de déphosphoration, superphosphates, phospho-guano), engrais potassiques et sodiques, composition et emploi, pour céréales, pour prairies, pour plantes sarclées, pour la vigne, en horticulture, préparation, achat, formules.

Chimie agricole. Le sol et les récoltes, par A.-D. HALL, directeur de la station expérimentale de Rothamsted et A. DEMOLON, ingénieur agronome. 1905, 1 vol. in-16 de 320 p., avec fig., cart. 4 fr.

ENVOI FRANCO CONTRE UN MANDAT POSTAL

Encyclopédie agricole

PUBLIÉE PAR UNE RÉUNION D'INGÉNIEURS AGRONOMES
SOUS LA DIRECTION DE
G. WERY
Sous-Directeur de l'Institut national agronomique

Introduction par le Dr P. REGNARD
Directeur de l'Institut national agronomique

40 volumes in-18 de chacun 400 à 500 pages, illustrés de ... uses figures

Chaque volume, broché : **5 fr.** ; cart... fr.

IV. — TECHNOLOGIE A...

Technologie agricole (*Sucrerie, meunerie, boulangerie, féculerie, amidonnerie, glucoserie*). — M. SAILLARD, ... des industries agricoles de D...

Industries agricoles de fermentation (*Cidrerie, Brasserie, Hydromels, Distillerie*)........ — M. Bou... ire à l'Institut Paste...

Vinification (*Vin, Vinaigre, Eau-de-Vie*).................. — M... t agronomique. ... Grignon.

Laiterie.................... ... de l'École d'indus-

Microbiologie agricole... ...ences à l'Institut agro-

Électricité agrico... ...ieur agronome.

Machin... *Moteu*... répétiteur à l'Institut agronomique.

Cons... ...oy, directeur des études à l'École d'agri...ure de Grignon.

Topographie agricole et Arpentage.......................... — M. MURET, professeur à l'Institut agronomique.

Drainage et Irrigations.......... — M. RISLER, directeur hon. de l'Institut agronomique. M. WERY, s.-directeur de l'Institut agronomique.

VI. — ÉCONOMIE ET LÉGISLATION RURALES

Économie rurale................ *Législation rurale*............... — M. JOUZIER, professeur à l'École d'agriculture de Rennes.

Comptabilité agricole........... — M. CONVERT, professeur à l'Institut agronomique.

Associations agricoles (*Syndicats et Coopératives*)......... — M. TARDY, répétiteur à l'Institut agronomique.

Hygiène de la [redacted] irecteur de l'Institut agronomique. ... iteur à l'Institut agronomique.

Le Livre de la [redacted]

